



Contribution à la modélisation et la caractérisation de composants et systèmes optoélectroniques

Zeno Toffano

► To cite this version:

Zeno Toffano. Contribution à la modélisation et la caractérisation de composants et systèmes optoélectroniques : Non linéarités dans les lasers à semiconducteurs. Optique / photonique. Université Paris XI Orsay, 2004. tel-01322909

HAL Id: tel-01322909

<https://hal.science/tel-01322909>

Submitted on 28 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire

Habilitation à diriger les recherches

Contribution à la modélisation et la caractérisation de composants et systèmes optoélectroniques Non linéarités dans les lasers à semiconducteurs

*Travaux effectués au Département des Télécommunications (ancien Service
Radioélectricité et Electronique) de l'École Supérieure d'Électricité,
Supélec, Campus de Gif-sur-Yvette.*

par

Zeno TOFFANO

**Soutenu le 25 novembre 2004 à Supélec
devant la Commission :**

Chérif BENDJABALLAH (*Dir. Rech. CNRS LSS Gif*)
Henri BENISTY (*Professeur U. Paris XI Orsay IOTA*)
Didier DECOSTER (*Professeur U. Lille IENM*)
Michel JOINDOT (*Exp. Ém. France Télécom Lannion*)
Hikmet SARI (*Chef Dept. Télécom Supélec Gif*)
Serge VERDEYME (*Professeur U. Limoges IRCOM*)

Président
Examineur
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Rapporteur

1 Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Table des matières | 3 |
| 2 | Notice individuelle | 4 |
| 2.1 | Curriculum Vitae | 4 |
| 2.2 | Encadrements de doctorants et stagiaires | 5 |
| 2.3 | Animations et responsabilités scientifiques | 6 |
| 2.4 | Relations avec d'autres laboratoires de recherche (avec publications communes) | 6 |
| 2.5 | Programmes de recherche européens et nationaux | 7 |
| 2.6 | Relations contractuelles avec le monde industriel | 8 |
| 2.7 | Activités d'intérêt collectif et diverses | 9 |
| 2.8 | Thèmes et intérêts de recherche | 10 |
| 2.9 | Activités d'enseignement | 11 |
| 3 | Notice bibliographique | 13 |
| 3.1 | Revue internationale | 13 |
| 3.2 | Revue nationale en français | 14 |
| 3.3 | Congrès internationaux avec actes | 14 |
| 3.4 | Congrès nationaux et internationaux en français avec actes | 16 |
| 3.5 | Revue Supélec | 18 |
| 3.6 | Thèse : RMN des conducteurs organiques (TMTSF) ₂ X, CEA Saclay | 18 |
| 3.7 | Ouvrage : « Optoélectronique, composants photoniques et fibres optiques » | 18 |
| 4 | Itinéraire et résumé des travaux de recherche | 19 |
| 5 | Synthèse des recherches | 25 |
| 5.1 | Spectres des modes laser à semiconducteur de type Fabry-Pérot et DFB | 25 |
| 5.2 | Distorsions, intermodulations et chirp dans les lasers monomodes DFB | 35 |
| 5.3 | Lasers à structure complexe, DBR et en barrette, influence des effets thermiques | 45 |
| 5.4 | Chaos dans les lasers et dans les oscillateurs : une approche pluridisciplinaire | 54 |
| 5.5 | Liaisons optiques infra-rouge en espace libre et par fibres optiques | 58 |
| 5.6 | Recherche en simulation des systèmes de télécommunications optiques | 62 |
| 5.7 | Travaux plus anciens en physique fondamentale | 79 |
| 6 | Perspectives de recherche | 81 |
| 6.1 | Nouvelle plateforme d'étude et caractérisation de modules optoélectroniques | 81 |
| 6.2 | Les développements du projet RMNT SHAMAN | 82 |
| 6.3 | Phénomènes chaotiques | 83 |
| 7 | Bibliographie pour la synthèse des recherches | 84 |

2 Notice individuelle

2.1 Curriculum Vitae

2.1.1 État civil

Nom

TOFFANO Zeno

né le 1/1/1961 à Bolzano (Italie)

Département des Télécommunications
Supélec
3 rue Joliot Curie
F-91192 Gif-sur-Yvette France cedex
tel. 0169851440 fax. 0169851234
courrier électronique: zeno.toffano@supelec.fr

2.1.2 Formation

- Baccalauréat Scientifique, Lycée italien Paris, 1978.
- Licence de Physique U. Orsay 1981
- Maîtrise de Physique U. Orsay 1982
- Diplôme d'Etudes Approfondies en Physique des Solides U. Orsay 1983.
- Doctorat III cycle Physique des Solides U. Orsay, recherche effectuée au C.E.A. Saclay, 1983-1985.
- Diplôme de Spécialisation en Systèmes Électroniques SUPELEC 1986.

2.1.3 Expérience professionnelle

- Stagiaire de DEA : Laboratoire LURE Université d'Orsay (1982).
- Allocataire de recherche, pour effectuer une thèse, Service de Physique du Solide et Résonance Magnétique, Orme des Merisiers, CEA Saclay (1983-1985).
- Enseignant-chercheur à SUPELEC, Campus de Gif-sur-Yvette, au Service Radioélectricité et Électronique, recruté depuis mai 1987.

2.1.4 Langues

- Italien (lu, parlé et écrit, langue paternelle et parlé en famille)
- Anglais (lu, parlé et écrit, maternelle en Angleterre, primaire américaine en Yougoslavie et en Lybie)
- Allemand (lu, parlé et écrit, langue maternelle région bilingue Italie du nord)
- Espagnol (notions)

2.2 Encadrements de doctorants et stagiaires

2.2.1 Encadrement (co) de doctorants

- [TH1] Thèse de *Hao DING* , « Spectres optiques de diodes laser : méthodes d'analyse des spectres-Modélisation physique », sout. 27 septembre 1988, UPS.
Encadrement : Alain Destrez (80%), Zeno Toffano (20%)
- [TH2] Thèse de *Christelle BIROCHEAU*, « Analyse du spectre de la dynamique et du bruit des lasers à semi-conducteurs, Fonctionnement au seuil et en présence de rétroaction optique en régime de perte de cohérence », sout. 13 décembre 1993, UPS.
Encadrement : Alain Destrez (60%), Zeno Toffano (40%)
- [TH3] Thèse de *Lotfi HASSINE* , « Analyse non linéaire des lasers à semi-conducteur par les séries de Volterra, Modulations et bruits », sout. le 26 janvier 1994, UPS.
Encadrement : Zeno Toffano (70% responsable de l'encadrement), Alain Destrez (30%)
- [TH4] Thèse de *Shirin BOZORGUI*, « Modélisation des lasers semiconducteurs à réflecteur de Bragg (DBR) : Analyse des effets thermiques et du réseau à pas variable », sout. le 20 nov. 1997, UPS.
Encadrement : Alain Destrez (50%), Zeno Toffano (50%)
- [TH5] Thèse de *Juan Manuel CAMPOS*, «Contribution à l'étude de la largeur de mode dans les diodes laser DBR à puits quantiques à deux sections /Analyseur spectral ultrarapide», 27 février 2004, UPS.
Encadrement : Alain Destrez (70%), Zeno Toffano (30%)
- [TH6] Thèse de *Asghar GHOLAMI* , « Optimisation de composants MOEMS pour communication haut débit », en cours depuis septembre 2003.
Encadrement: Zeno Toffano (70% directeur de thèse, dérog. UPS 27/11/03), Alain Destrez (30%)

2.2.2 Encadrement de stagiaires en Master of Science

- 1991-1992 *Mike BYRNE* , étudiant en MSc du University College London, stage de fin d'études, programme Erasmus. « Simulation des caractéristiques dynamiques d'un laser à semiconducteur monomode ».
- 1993-1994 *Jurgen HILDEBRANDT*, étudiant de l'Université de Stuttgart Allemagne Nachrichten-Übertragungstechnik, programme Erasmus « Mise au point d'un système de mesure des distorsions harmoniques pour les lasers semiconducteurs DFB monomodes ».
- 1994-1995 *Axel SAUTTER*, étudiant de l'Université de Stuttgart Allemagne Nachrichten-Übertragungstechnik, programme Erasmus, « Evaluation et estimation des distorsions harmoniques d'un laser à semiconducteur à partir des équations d'évolution ».
- 1997-1998 *Raffaella VINZIO* , Stage de « Dottorato », Erasmus Polytechnique Turin Italie - Supélec : « Analyse non linéaire du comportement dynamique des lasers DFB : transmissions CATV et micro-ondes».
- 2001-2002, *Lazhari KHELIFI* de Sup'com Tunis, Tunisie, « Normes VSR et IEEE étude des performances de gigue et de facteur Q dans le cadre du projet RMNT SHAMAN ».
- 2002-2003, *Stefan DINECI* de l'Institut Polytechnique de Bucarest, Roumanie, « Modèle multimode du VCSEL, dans le cadre du projet RMNT SHAMAN ».
- 2003-2004, *Manuel LOPES-PINO* de l'Université de Valence, Espagne, « Caractérisation d'une liaison optique courte distance par l'étude du diagramme de l'œil ».
- 2003-2004 *Cristina CIOCHINA* de l'Institut Polytechnique de Bucarest, Roumanie, « Etude du chaos dans les lasers monomode, analogies électroniques et applications aux communications ».

2.3 Animations et responsabilités scientifiques

- Au **Service Radioélectricité et Electronique de Supélec**, responsable du thème de recherche modélisation de composants et systèmes optoélectroniques pour télécommunications optiques au sein de l'équipe Optoélectronique : 2 enseignants chercheurs : Alain Destrez et Zeno Toffano, 8 thésards (7 soutenues, 1 thèse en cours).
- En collaboration avec **F. Hartemann (chercheur MIT et LLNL)** proposition de modèles et interprétations théoriques pour les phénomènes nonlinéaires dans les interactions lumière matière très haute énergie (1990 et 1996).
- Dans le cadre des **programmes de recherche européens PROMETHEUS (1987-1989) et DRIVE (1990-1991)**, responsable pour Supélec des actions de recherche sur les systèmes de communications optiques infrarouge dans les applications pour automobile.
- **Marché d'études avec Opto+ (France Télécom et Alcatel) (1998-2000)** sur la caractérisation et la simulation de barrettes de lasers pour DWDM, responsable technique pour Supélec.
- **Projet RMNT « SHAMAN » (2002-2004)**, sur la simulation de modules optoélectroniques de communication. Responsable technique pour Supélec au sein du consortium : Supélec, ENST Paris, Lab CNRS PHASE Starsbourg, ENSAE Supaéro Toulouse, THALES TRT, IPSIS.
- Proposition scientifique et mise en place (2003 - en cours) d'une plateforme expérimentale d'étude et d'évaluation de modules optoélectroniques très haut débit avec le soutien des programmes **ASTRE** (Action de Soutien à la Technologie et la Recherche en Essonne) et **SESAME** (Soutien aux Equipes Scientifiques pour l'Acquisition de Moyens Expérimentaux) dans le cadre de **PRISME** (Plateforme Régionale Ile-de-France Sud de Mesures et d'Expertises) coordonnée par **Optics Valley**.
- **Projet Pluri Formation (PPF) sur le chaos (2003 - en cours)** dans les systèmes optoélectroniques en association avec une équipe du campus de Metz à laquelle nous sommes associée au sein du LMOPS (Laboratoire Matériaux Optiques Physique et Systèmes). Responsable du thème de recherche sur l'étude du chaos dans les oscillateurs laser et électroniques.

2.4 Relations avec d'autres laboratoires de recherche (avec publications communes)

- (1983-1986) Pendant ma thèse : Jean-Marc DELRIEU, Michel ROGER, Département de Physique Fondamentale, **CEA Ormes des Merisiers**, K. BECHGAARD, A. MORADPOUR **Lab. Physique des Solides UPS** [R1t], [R2t], [R3t], [CI1t].
- (1990, 1996) Travail sur l'électrodynamique dans les milieux continus : Frédéric HARTEMANN, **Plasma Fusion Center, MIT Cambridge, USA** [R4p], [R11p], [CI4p].
- (1990-1991) Projet européen DRIVE DACAR : L.H.M van der HART, **Bakkenist, Diemen, Hollande**, Jean-Louis BOUCHERON, **Centre de recherches VALEO**, Créteil France. [CI6], [CI6]
- (1990-1991) Lors de la coopération et du travail sur les fibres optiques : Bernie GUMARANG, **Electronics & Communications Eng'g Dept. De La Salle University, Manille Philippines**, [CI5], [CN3].
- (1988) Lors des marchés d'études CNET : Patrick JUNCAR [CN1], **Bureau National de Métrologie Paris**.
- (1988-1994) Lors des marchés d'études CNET : Irène JOINDOT [R8], [CI8], **CNET France Télécom Lannion, France**.
- (1991-1994) Lors du travail de thèse de Lotfi HASSINE : Françoise LAMNBHI-LAGARRIGUE [R7], [R8], **Laboratoire des Signaux et Systèmes, CNRS Supélec**.

- (1995) Lors du travail de these de Shirin BOZORGUI sur les réseau de Bragg courbés : Hartmut HILLMER [CI11], **Research Group Optoelectronic Devices, Deutsche Telekom, Darmstadt, Allemagne.**
- (1999-2000) Lors du marché d'études sur les lasers DFB et DBR en barrette pour DWDM : Anne TALNEAU, Sophie MENEZO **Opto+ Marcoussis.**
- (2001) Lors du travail sur les fibres optiques plastique Azzedine BOUDRIA et Régis KREMER [CN16], **LMOPS CLOES, Metz, France.**
- (2002-2004) Lors du travail de thèse de Juan-Manuel CAMPOS, sur les lasers DBR à deux sections : Joël JACQUET, Hélène SILLARD [R15], [CI21], [CI22], [CN18], [CN19], [CN21], [CN24] **Alacatel Research and Innovation, Marcoussis, France.**
- (1998-1999) Lors du développement du modèle de laser pour COMSIS et pendant la thèse de Christine LEBRUN [CI16], [CN13], **INSA Rennes - IPSIS Cesson-Sévigné.**
- (1991-1994) Lors du projet **RMNT SHAMAN** avec le **consortium** [R14], [RN16], composé de : Jean-Claude MOLLIER [CI20], **Laboratoire Potonique Micro-ondes, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, (Supaéro) Toulouse,** Yannick HERVE, **Laboratoire PHASE CNRS, Université Louis Pasteur Starsbourg,** Patricia DESGREYS, Jean-Jacques CHARLOT [CN23], **Département communications et électronique, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications Paris,** Morgane MAREC, **IPSIS Cesson-Sevigné.,** Mathias PEZ et Gaëlle BARBARY [CN20], **Advanced Interconnect Technologies, THALES Research & Technology, Domaine de corbeville Orsay.**

2.5 Programmes de recherche européens et nationaux

- 1987-1989 **Programme européen EUREKA PROMETHEUS « WorkGroup PRO-COM** : étude du canal de communication optique infrarouge entre véhicules, *PSA, Renault.* (Zeno Toffano co-responsable technique pour Supélec avec Gérard Attal, Georges Seignier)
- 1990-1991 **Programme européen DRIVE « Advanced Telematics in Road Transport** », . Sous-contractant de la **société VALEO** dans le **projet DACAR** (Data Acquisition and Communication techniques and their Assessment for Road transport) The DACAR Infrared System, subproject 6 (Zeno Toffano responsable technique pour Supélec).
- 1993-1995 **COST Action 240, « Modelling and Measuring Advanced Photonic Telecommunications Components** » souscontractant de **France Telecom CNET Lannion.** (Alain Destrez, Zeno Toffano)
- 2002-2004 : « **Nouvelles possibilités de modélisation de composants de type MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems)** », **projet RMNT (Réseau micro et Nano Technologies) SHAMAN n°01 V 0907** Ministère de la Recherche. Consortium : THALES, Telecom Paris, SupAéro, U. Strasbourg, IPSIS, Mentor Graphics. (Zeno Toffano responsable technique pour Supélec, Alain Destrez).
- 2003-2005 : **Projet Pluri Formation, Ministère de la Recherche**, Supélec campus de Gif et Supélec campus de Metz « **Analyse croisée du chaos dans les solitons photoréfractifs et dans les oscillateurs électroniques et optoélectroniques** », en charge de la partie chaos dans les oscillateurs. (Zeno Toffano, Alain Destrez)
- 2003-2005 : **programmes ASTRE (Action de Soutien à la Technologie et la Recherche en Essonne) du Conseil Général de l'Essonne et SESAME (Soutien aux Equipes Scientifiques pour l'Acquisition de Moyens Expérimentaux) de la Région Ile de France** pour aider à la mise en place d'une Plateforme Expérimentale d'étude et d'évaluation de modules optoélectroniques très haut débit. (Alain Destrez co-rsponsable, Zeno Toffano co-responsable)

2.6 Relations contractuelles avec le monde industriel

- 1989-1990 « Banc de mesure de largeur de mode des lasers à semiconducteurs multimodes » 1,3 - 1,55 μ m Marché d'études **France Télécom CNET Lannion**.
(Alain Destrez, Zeno Toffano).
- 1989-1990 « Etude du phénomène de second claquage dans les transistors » Contrat d'étude industrielle.
(Zeno Toffano, Sophie Baccar, André Pacaud)
- 1991-1992 « Etude des effets de la modulation et de la rétroaction optique sur la largeur de mode des diodes laser DFB ». Marché d'études **France Télécom CNET Lannion**.
(Alain Destrez, Zeno Toffano).
- 1993-1994 « Étude du glissement de fréquence des diodes laser de structures récentes ». Marché d'études **France Télécom CNET Lannion**.
(Alain Destrez, Zeno Toffano).
- 1995-1996 « Analyse du chirp de diodes laser DFB et son évolution dans le temps ». Dans le cadre du groupe européen COST 240. Marché d'études **France Télécom CNET Lannion**.
(Alain Destrez, Zeno Toffano).
- 1994-1995 « Mesure et exploitation du chirp pour des lasers semiconducteurs utilisés pour les systèmes large bande analogiques de type CATV » **LCR Thomson**.
(Alain Destrez, Zeno Toffano).
- 1998-2000 : « Comportement thermique de diodes laser mono-fréquence en barrette : simulation et caractérisation » Marché d'études **OPTO+, France-Télécom, Alcatel**.
(Zeno Toffano, Alain Destrez).
- 1999-2000 : « Etude sur les fibres optiques », **Alcatel**
(Alain Destrez, Thierry Letertre, Zeno Toffano)
- 1999-2000 : « Etude sur le multiplexage en longueur d'onde ». Contrat d'étude industrielle avec la société **SAGEM**.
(Zeno Toffano).
- 2001 : « Etude technico-économique sur le développement d'outils de simulation de la propagation d'impulsions lumineuses dans les fibres optiques », **PréConseil Technologique CRITT-CCST** pour la société **OXALIS-Laser**.
(Zeno Toffano).

2.7 Activités d'intérêt collectif et diverses

2.7.1 Participation à des comités de lecture

- Annales des Télécommunications
- Journal of Applied Optics, OSA
- Journal of Selected Topics in Quantum Electronics IEEE

2.7.2 Participations à des jurys de thèse

- Examineur de **Lotfi Hassine**, thèse soutenue 26/1/1994 Supélec UPS, [TH3]
- Examineur de **Christine Le Brun**, thèse soutenue 26/10/1999 INSA Rennes, « Développement de la nouvelle bibliothèque de composants optiques de COMSIS »
- Examineur de **Juan Manuel Campos**, thèse soutenue 27/2/2004 Supélec UPS, [TH6]
- Examineur invité de **Malik Hocine**, thèse soutenue 23/9/2004 Université de Metz Supélec, « Modélisation de la formation d'un micro-composant organique réalisé en extrémité de fibre optique par photopolymérisation »

2.7.3 Invitations à des conférences

- DRIVE Conference, Bruxelles, février 1991
- Telecomex ASIA 91, Manille Philippines, mai 1991
- Europnet 2001, Paris janvier 2001
- Europnet 2002, Paris janvier 2002

2.7.4 Responsabilités d'enseignement

- Responsable pédagogique des enseignements de Physique Quantique sur les campus de Supélec (Gif-sur-Yvette, Rennes, Metz) (depuis 2001)
- Responsable des cours en Optoélectronique à Supélec option ECN (Electronique et Communications Numériques) sur le campus de Gif-sur-Yvette et option SCO (Systèmes de Communications Optiques) sur le campus de Metz.
- Coordinateur pédagogique des cours Entreprises Innovantes en 1^{re} année à Supélec. (depuis 2000)
- Responsable du stage BG1, bases de l'électronique en formation continue à Supélec. (depuis 1997).

2.7.5 Missions à l'étranger

- **Deux séjours d'un mois en 1990 et en 1991** : collaboration de recherche et formation en optoélectronique et en communications par fibre optique (en anglais) avec le Electronics & Communications Eng'g Dept. de de **La Salle University, Manille, Philippines**, sous proposition du Ministère des Affaires Etrangères par l'intermédiaire de la SFERE (Société Française d'Exploitation des Ressources Educatives).
- **Septembre 1996** : formation sur la transmission sur fibres optiques dans le cadre de la formation continue de Supélec pour le compte de la SAT (groupe Sagem) et la **société de Télécommunications du Costa Rica à San Jose Costa Rica**.
- **Novembre 1999** : Formation et collaboration de recherche sur les composants optoélectroniques avec **l'Ecole Supérieure des Communications, Sup'Com à Tunis, Tunisie**, avec le soutien du Ministère des Affaires Etrangères.

2.7.6 Autres responsabilités au sein de Supélec

- (1999-2003) Coordinateur de l'incubation et de la valorisation de projets innovants (Start-Ups) au sein de Supélec par des étudiants en dernière année.
- (1990-2000) Représentant de Supélec et Trésorier de l'Association de Gestion des Installations Sportives du Moulon (AGIM).

2.8 Thèmes et intérêts de recherche

2.8.1 Thèmes de recherche abordés

- **Etude des cristaux organiques supraconducteurs (TMTSF)₂X par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)** (Thèse Physique des Solides C.E.A Saclay. 1983/85).
- **Etude de transmissions optiques infrarouge pour applications automobile.**
- **Approche relativiste de l'électrodynamique dans les milieux continus (collaboration).**
- **Modélisation et caractérisation de lasers à semiconducteurs pour transmissions optiques.**
 - Etude de la transition de phase du seuil : largeur spectrale, bruit d'émission spontanée.
 - Etude des nonlinéarités : modélisation de Volterra, caractérisation des distorsions.
 - Analyse des effets thermiques sur les barrettes de puces lasers applications aux lasers monomodes DFB et VCSEL.
 - Etude de l'influence des modes transverses sur les performances des micro-lasers à émission par la surface (VCSEL) pour communications optiques.
- **Etude des propriétés des fibres optiques**
 - Etude des polariseurs en fibre optique monomode.
 - Propriétés de transmission des fibres optiques plastique.
- **Etude du chaos dans les oscillateurs électroniques et laser**
- **Analyse de modèles pour les modules optoélectroniques de transmission pour CAO.**
 - Modules MOEMS pour communications par fibre optique courte distance haut débit.
 - Liaisons multiplexées en longueur d'onde DWDM.
 - Modèle d'un laser semiconducteur pour CAO défini par les paramètres système.

2.8.2 Projets de recherche futurs

- **Modélisation de modules optoélectroniques utilisant des lasers à semiconducteurs VCSEL**
 - Influence du caractère multimode spatial des VCSEL sur les performances : bande passante des fibres optiques, diagramme de l'œil et taux d'erreurs des liaisons de type 10 Gigabit Ethernet.
 - Proposition de design de nouvelles structures de VCSEL monomodes.
 - Prototypage virtuel de systèmes de communications optiques à haute densité d'intégration, utilisation dans les futurs outils de CAO optoélectronique.
- **Etude des phénomènes chaotiques spatio-temporels.**
 - Analogies entre les solitons photoréfractifs optiques et les oscillateurs chaotiques électroniques.
 - Recherche de comportements chaotiques pour un laser semiconducteur à élargissement homogène.
 - Extension des études aux réseaux de diodes laser et à d'autres réseaux chaotiques par exemple dans des nanosystèmes à base de microlasers.

2.8.3 Sociétés savantes et groupes de discussion scientifique

- Depuis 1990, **Membre IEEE LEOS** (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Laser and Electro-Optical Society).
- 1997-2000. Membre de la liste de discussion, avoid-l@hawaii.edu, coordonnée par le Prof. V. J. Stenger Astrophysics Dept. U. Hawaii, sur le implications de la physique quantique, publication de l'ouvrage « Timeless reality : symmetry, simplicity and multiple universes », Ed ; Prometheus Books 2000.

2.9 Activités d'enseignement

2.9.1 Formation initiale

- Cours « Physique Quantique », enseignement tronc commun, 1^{re} Année Supélec (depuis 2001).
- Cours « Optoélectronique », option Électronique et Communications Numériques, 3^e année Supélec (depuis 1994)
- Cours « Optoélectronique », option Systèmes de Communications Optiques, 3^e année Supélec (depuis 1998).
- Cours « Optique et Photonique » enseignement électif en 2^e année Supélec (depuis 1994).
- Cours « Réseaux par Fibres Optiques », Mastère SIT (Systèmes Intelligents de Transports) , ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (depuis 1998).
- Cours « Optique et Transmissions Optiques », ESIGETEL Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Génie Electrique et Télécommunications (1990-1996)
- Travaux dirigés en 1^{re} et 2^e année à Supélec : « Electronique Radiofréquence », « Champs et Propagation », « Physique Quantique » et « Physique des Solides ».
- Etudes de laboratoire en 1^{re} et 2^e année : électronique analogique et radio-fréquence
- Etudes de laboratoire en 3^e année : systèmes de transmissions par fibres optiques.

2.9.2 Formation continue

- « Sources et détecteurs optoélectroniques », stages : Optoélectronique et Fibres Optiques Supélec.
- « Optoélectronique », stage : Bases de l'électronique Supélec.
- « Principes des circuits électriques », stage : Bases de l'électronique Supélec.
- « Transmission par fibres optiques » Stage intra-entreprises pour Bouygues Telecom et Ministère Intérieur.
- « Modèles de propagation », stage intra-entreprises Bouygues Telecom et Ministère Intérieur.
- « Fibres optiques et composants optoélectroniques », stage intra-entreprise THOMSON Broadcasting Systems (1996).

2.9.3 Documents pédagogiques

- Z. TOFFANO, « Optoélectronique », Cours Supélec 3^e année ECN, 164 pages, n°11015, 1995.
- Z. TOFFANO, « Optique et Photonique », Cours Supélec 1^{ère} année, 142 pages, n°04069, 1998.
- Z. TOFFANO, « Composants émetteurs à semiconducteurs », Cours formation continue Supélec, 44 pages, n°06800/01, 2002.
- Z. TOFFANO, « Composants détecteurs à semiconducteurs », Cours formation continue Supélec, 22 pages, n°06800/02, 2002.
- Z. TOFFANO, « Propagation optique en espace libre », Cours Mastère SIT, Supélec - ENPC, 30 pages, n° 07014, 1998.
- Z. TOFFANO, « Circuits et signaux », Cours formation continue, 42 pages, n° 07167, 2000.

2.9.4 Encadrement de projets d'étudiants à Supélec

2.9.4.1 Projets en 3^e année (durée 6 mois, projets longs ou études industrielles)

1987/88 : Liaison Infra Rouge entre véhicule et balise.
1988/89 : Simulation du phénomène de second claquage dans les transistors bipolaires.
1989/90 : Simulation du phénomène de second claquage dans les transistors JFET.
1990/91 : Etude d'une liaison infra-rouge balise véhicule d'après le projet Valeo Dacar Drive.
1991/92 : Modélisation non-linéaire d'une diode laser.
1992/93 : Etude de la largeur spectrale d'un laser semi-conducteur.
1993/94 : Etude des émetteurs et liaisons optiques pour des applications des liaisons optiques CATV.
1994/95 : Influence des non-linéarités sur les distorsions dans les liaisons par fibre optique.
1995/96 : Comportement dynamique des lasers DBR multielectrodes.
1996/97 : Caractérisation de composants pour liaisons optiques CATV.
1996/97 : Modélisation des défauts de transmission des liaisons optiques multicolores.
1997/98 : Logiciel de simulation des lasers à semiconducteurs avec paramètres constructeur.
1998/99 : Effets thermiques dans les sources optiques pour réseaux de télécommunications DWDM.
1999/2000 : Etude de multiplexage dense en longueur d'onde.
2001/2002 : Effets thermiques dans les lasers à semiconducteur VCSEL.
2002/2003 : Analyse des performances des modules optoélectroniques SHAMAN.

2.9.4.2 Projets en 1^{re} et 2^e année (durée 2-3 mois)

- Liaisons optiques aériennes par voie Infra Rouge (10 projets).
- Modélisation des phénomènes liés aux lasers à semiconducteur (10 projets).
- Outils pédagogiques pour l'enseignement de l'optoélectronique (4 projets).
- Modélisation de liaisons par fibre optique (10 projets).
- Chaos en électronique et analogie avec les lasers (15 projets).
- Conception de circuits à l'aide de portes en logique quantique (5 projets).

3 Notice bibliographique

3.1 Revues internationales

En rapport avec le travail de thèse : spécialité Physique des Solides [RXt]

[R1t] **Z. TOFFANO**, K. BECHGAARD, A. MORAPOUR, « N.M.R. proton lineshape in single crystals TMTSF₂X », *Mol.Cryst & Liq.Cryst.*, vol.119, 151-154, (1985).

[R2t] J. M. DELRIEU, M. ROGER, **Z. TOFFANO**, A. MORADPOUR, and K. BECHGAARD, « N.M.R. proton lineshape in (TMTSF)₂X : incommensurability of nesting vector and order parameter » *J. Phys. France* , 47, 839 (1986).

[R3t] J. M. DELRIEU, M. ROGER, **Z. TOFFANO**, « Nesting vector, amplitude and anisotropy of SDW in TMTSF₂X obtained by NMR », *Physica B&C*, vol.143 B+C, n°1-3, pp.412-416, (1986).

Après la thèse, en optoélectronique [RX] en physique électrodynamique des lasers [RXp]

[R4p] HARTEMANN F. and **Z. TOFFANO** "Relativistic electrodynamics of continuous media", *Physical Review A*, 41, 5066 (May 1990).

[R5] **TOFFANO Z.**, DESTREZ A., BIROCHEAU C., HASSINE L. "New Linewidth Enhancement Determination Method in Semiconductor Lasers Based on Spectrum Analysis Above and Below Threshold.", *Electronics Letters*, 1992 Vol 28 N°1 pp.9-11.

[R6] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, I. JOINDOT, C. BIROCHEAU, and L. HASSINE, "Measurement of spectral characteristics of semiconductor Laser diodes - Effect of injected current modulation and optical feedback" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* , Vol. 42, n° 2, April 1993, pp. 304-310.

[R7] L. HASSINE, **Z. TOFFANO**, F. LAMNABHI-LAGARRIGUE, A. DESTREZ, C. BIROCHEAU , "Volterra Functional Series Expansions for Semiconductor Lasers under Modulation" *IEEE Journal of Quantum Electronics* , Vol. 39, n° 4, April 1994, pp. 918-928.

[R8] L. HASSINE, **Z. TOFFANO**, F. LAMNABHI-LAGARRIGUE, I. JOINDOT, A. DESTREZ, "Volterra functional series expansions for noise in semiconductor lasers under Modulation" *IEEE Journal of Quantum Electronics* , Vol. 39, n° 11, November 1994, pp. 2534-2546.

[R9] C. BIROCHEAU, **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ "Linewidth Evolution in Semiconductor Lasers Throughout Threshold", *Annales de Télécommunications*, 1994, Vol 49, N°11-12, pp. 607-618.

[R10] **Z. TOFFANO** and A. DESTREZ "New gain compression factor determination by harmonic analysis in semiconductor lasers", *Electronics Letters*, 1995 Vol. 31 N°3 pp. 202-203.

[R11p] F.V. HARTEMANN, A.L. TROHA, N.C. LUHMANN, Jr. and **Z. TOFFANO** "Spectral analysis of the nonlinear relativistic Doppler shift in ultrahigh intensity Compton scattering", *Physical Review E* 54, 2956 (1996).

[R12] **Z. TOFFANO** "Investigation of Threshold Transition in Semiconductor Lasers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997 Vol. 3 N°2 pp. 485-490.

[R13] R. VINZIO, **Z. TOFFANO** and A. DESTREZ, "Analytical Formulation of Distortion and Chirp in CATV DFB Lasers Including Spatial Hole Burning", *IEEE Journal of Quantum Electronics* , Vol. 34, n° 2, February 1998, pp. 311-317.

[R14] **Z. TOFFANO**, M. PEZ, P. DESGREYS, Y. HERVE, C. LE BRUN, J.C. MOLLIER, G. BARBARY, J.J. CHARLOT, S. CONSTANT, A. DESTREZ, M. KARRAY, M. MAREC, A. RISSONS, S. SNAIDERO, « Multilevel Behavioral Simulation of VCSEL based Optoelectronic

Modules », *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 9, pp. 949-960, May-Jun. 2003.

[R15] J. M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET and **Z. TOFFANO**, « Ultra-Fast Optical Spectrum Analyzer for DWDM Applications », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol: 53, pp:124-129, Feb. 2004.

3.2 *Revue nationale en français*

[RN16] C. LEBRUN, M. PEZ, P. DESGREYS, **Z. TOFFANO**, Y. HERVE, J.-C. MOLLIER, J. OUDINOT, « SHAMAN, une approche multidisciplinaire pour la conception de modules d'interconnexion optique », *Revue de l'Électricité et de l'Électronique REE de la SEE*, n°9, Octobre 2002, pp. 68-74.

3.3 *Congrès internationaux avec actes*

En rapport avec le travail de thèse : spécialité Physique des Solides

[CI1t] **Z. TOFFANO**, K. BECHGAARD, A. MORAPOUR, « N.M.R. proton lineshape in single crystals TMTSF₂X », International Conference on the Physics and Chemistry of Low-Dimensional Synthetic Metals, ICSM 84, Abano Terme, Italie, 17-22 juin 1984, p. 67.

Après la thèse

[CI2] A. DESTREZ and **Z. TOFFANO** "Measurement of coherence parameters in multimode Buried Heterostructure Laser Diodes." 1989 URSI International Symposium on Signals, Systems and Electronics ISSSE'89, 18-20 Sept. 1989, Nürnberg RFA, pp. 168-172.

[CI3] Gérard ATTAL, **Z. TOFFANO**, "Characterisation of Infrared Transmission Channel for High-Data-Rate Short-Distance Communications, Link Budget and Associated Equipment", Prometheus Workshop, May 22-23, 1989, Wolfsburg RFA, pp. 254-259.

[CI4p] F. HARTEMANN and **Z. TOFFANO** « Covariant Electrodynamics of Nonlinear Media », Twelfth International Free Electron Laser Conference, Paris, France, 17-21 septembre 1990, p. 27.

[CI5] **Z. TOFFANO**, "Fibre Optics Technology and Applications" Telecomex ASIA'91 and Electronics ASIA'91 International Exhibition and Conference, Manille, Philippines, 12-19 Mai 1991.

[CI6] L.H.M. VAN DER HART, **Z. TOFFANO**, J.L. BOUCHERON "The Dacar Infrared Communication Systems", Proceedings of the DRIVE Conference "Advanced Telematics in Road Transport" : Brussels, February 4-6, 1991 Ed. ELSEVIER pp.468-481.

[CI7] L.H.M. VAN DER HART, J.L. BOUCHERON et **Z. TOFFANO** "The DACAR Infrared Experiments", Proceedings of the DACAR conference on communication techniques in road traffic informatics Rome, 7-8 May 1991 pp 102-115.

[CI8] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, I. JOINDOT, L. HASSINE and C. BIROCHEAU "Measurement of spectral characteristics of semiconductor Laser diodes : effect of injected current modulation and optical feedback" CPEM, Conference on precision electromagnetic measurements 9-12 June 1992 Paris, pp.136-137.

[CI9] L. HASSINE, **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, C. BIROCHEAU, "Laser diode modulation : nonlinear modelisation by Volterra series", International Symposium on Signal, Systems & Electronics de l'Union Radio-Scientifique Internationale ISSSE'92, pp.785-788, Paris 1-4 Septembre 1992.

- [CI10] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, C. BIROCHEAU & L. HASSINE, "Single-Mode DFB-SQW Chirp Fabry-Perot Interferometric Measurements" 2nd Optical Fibre Measurement Conference OFMC '93 Torino Italy pp.155-158, September 21-22 1993.
- [CI11] S. BOZORGUI, H. HILLMER, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Chirped Grating DBR laser using bent waveguides", San-Francisco, du 30 octobre au 2 novembre 1995, IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS'95), pp. 264-265.
- [CI12] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO** "Measurement of relevant characteristics of semiconductor lasers used in CATV applications", COST 240 Workshop, "Characterization Techniques for Active and passive Photonic Components", 25 mars 1996, Budapest, Hongrie.
- [CI13] **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, S. BOZORGUI, "Threshold analysis of semi-conductor lasers : novel parameter extraction method", European Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO, Hambourg 8-13 septembre 1996, CThI23 p. 262
- [CI14] S. BOZORGUI, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "An analysis of thermal effects and its influence on the laser dynamics in three-electrode DBR lasers", High performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications Workshop EDMO'96, 25-26 November 1996 ; Weetwood Hall, Leeds, UK pp. 108-113.
- [CI15] S. BOZORGUI, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Effects of chirped gratings on tunability of multielectrode DBR lasers", High performance Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications Workshop EDMO'96, 25-26 November 1996 ; Weetwood Hall, Leeds, UK pp. 91-95.
- [CI16] C. LE BRUN, **Z. TOFFANO**, « Laser Diode for Simulator : Description by System Parameters », 10th Microcoll, March 21-24, 1999, Budapest Hungary.
- [CI17] **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, H. GUÉGUIN, S. MÉNÉZO, A. TALNEAU, « Thermal and spectral analysis of WDM laser diode arrays », 5th Optical Fibre Measurement Conference, Nantes, 22-24 September 1999, pp. 186-189.
- [CI18] **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, "Modeling of DWDM channel link budgets including OADM and OXC modules ; crosstalk and dispersion influence", 8th International Conference on Optical Communications and Networks, EurOpnet 2001 Paris 30 janvier 1 février 2001, pp. 107-114.
- [CI19] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, « Analysis of Plastic Optical Fibers for Local and Access Optical Networks » 9th International Conference on Optical Communications and Networks, EurOpnet 2002 Paris 29-30 janvier 2002, pp. 263-282.
- [CI20] A. RISSONS, JC MOLLIER, **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, M. PEZ, "Thermal and Optoelectronic Model of VCSEL arrays for short range communication", OPTO 2003 Photonics West, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VII, Chun Lei, Sean P. Kilcoyne, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4994 (2003), pp. 100-111.
- [CI21] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET, **Z. TOFFANO**; H. SILLARD « Fast spectral characterization of tunable laser diodes », OPTO 2003 Photonics West, Optical Devices for Fiber Communication IV, Michel J. F. Dignonnet, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 4989 (2003), pp. 53-60.
- [CI22] J. M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET, **Z. TOFFANO**, « Ultra-Fast Spectral Analysis of DBR Laser Diodes », The International conference on Photonics in Switching, Versailles, 28 septembre-2 octobre 2003, pp. 17-19.
- [CI23] **Zeno TOFFANO**, Asghar GHOLAMI, Mathias PEZ; Alain DESTREZ, Morgane MAREC « VCSEL Short Reach Communications: Behavioural Modelling of High Speed Optoelectronic Modules », Proc. 4th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 24-26 August, 2004, University of California at Santa Barbara, IEEE Cat No. 04EX874, ISBN : 0-7803-8530-6, paper WC3, pp. 49-50.
- [CI24] A. GHOLAMI, **Z. TOFFANO**, R. LOPEZ-PINO, A. DESTREZ , M. PEZ, « VCSEL Spatiotemporal Behaviour in Gigabit Ethernet Optoelectronic Modules », 10th Microoptics Conference, September 1-3, 2004, Friedrich-Schiller-University Jena Germany, paper M4.

3.4 Congrès nationaux et internationaux en français avec actes

- [CN1] A. DESTREZ, P. JUNCAR, H. DING, **Z. TOFFANO** et G. ATTAL "Analyse énergétique et modale des spectres laser à 1,3 μm ." Conférence OPTO'88 17-19 mai 1988, Paris , pp. 247-250.
- [CN2] H. DING, E. MOSCHIM, **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ et G. ATTAL "Modèle de simulation adapté aux caractéristiques dynamiques des laser Semiconducteurs." Conférence OPTO'88 17-19 Mai 1988 Paris, pp. 237-240.
- [CN3] A. DESTREZ, B. GUMARANG et **Z. TOFFANO** "Caractérisation et différentes configurations de polariseurs à 1300 nm. réalisées en fibre monomode" Conférence OPTO'90 15-17 Mai 1990 Paris, pp. 450-453.
- [CN4] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO** et S. DAVIS "Etude expérimentale de l'influence de différentes conditions de rétroaction optique sur les caractéristiques spectrales des diodes Laser multimodes pour télécommunications sur fibres optiques." Conférence OPTO'91 26-28 Mars 1991, pp. 272-276.
- [CN5] C. BIROCHEAU, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO** et L. HASSINE "Etude du bruit d'intensité optique sur des diodes Laser BH 1300 nm. soumises à une rétroaction optique." Conférence OPTO'92 14-16 Avril 1991, pp. 242-245.
- [CN6] C. BIROCHEAU, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO** et L. HASSINE, "Effets de la rétroaction optique sur la largeur spectrale des lasers à semi-conducteurs en fonction du courant de polarisation" , OPTO'93, Paris 11-13 Mai 1993, pp. 110-113.
- [CN7] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Mesure du chirp des diodes Laser en modulation d'intensité directe par analyse des spectres optiques AM et FM" OPTO'94, Paris 26-28 Avril 1994, pp. 367-370.
- [CN8] C. BIROCHEAU, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Élargissement spectral dû à la rétroaction optique sur les lasers à semi-conducteurs : influence du courant de polarisation et effets sur une liaison à fibres optiques", Conférence OPTO'95, Paris 28-30 mars 1995, pp. 57-60.
- [CN9] **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, "Détermination des non linéarités par analyse harmonique dans les lasers à semiconducteurs" OPTO 95, Paris 28-30 Mars 1995, pp. 61-64.
- [CN10] S. BOZORGUI, A DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Effet du réseau à pas variable dans les lasers à réflecteur de Bragg (DBR)", Quinzièmes Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'95, École Polytechnique de Palaiseau, 6-8 Novembre 1995, article N°37.
- [CN11] **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, S. BOZORGUI "Analyse optique spectrale des lasers à semi-conducteurs au seuil : caractérisation de l'émission spontanée et du couplage phase amplitude", OPTO 96, Paris 19-21 Mars 1996, pp. 65-68.
- [CN12] S. BOZORGUI, A DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Non-linéarités des transmissions FM optiques dues aux variations du paramètre de chirp des diodes laser DBR", Seizièmes Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'96, Université de Nice Sophia Antipolis, 28-30 Octobre 1996, article N°46 pp.147-149.
- [CN13] C. LEBRUN, **Z. TOFFANO**, "Description d'un modèle de diode laser pour simulateur par des paramètres système", Dixhuitièmes Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'98, Marly-le-roi, 26-28 Octobre 1998, pp. 103-105.
- [CN14] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, "Instrumentation pour la détermination du chirp des diodes laser pour télécommunications", Colloque interdisciplinaire en instrumentation - C2I'98, Cachan, 18-19 novembre 1998, ed. Hermes, pp.79-86.
- [CN15] A. DESTREZ, T. LETERTRE et **Z. TOFFANO**, "Bande passante des fibres optiques en plastique PMMA multimodes à saut d'indice : influence de l'équilibre modal ", Colloque

interdisciplinaire en instrumentation, C2I 2001 Paris 31 janvier 1 février 2001, Instrumentation pour les mesures physiques Ed. Hermes pp. 389-395

[CN16] A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, Azzedine BOUDRIOUA, Régis KREMER, «Bande passante des fibres optiques en plastique PMMA », OPTIX 2001, Marseille 26-28 novembre 2001.

[CN17] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, « Influence des variations du paramètre α sur la largeur de mode des diodes laser DBR à deux sections à puits quantiques », , OPTIX 2001, Marseille 26-28 novembre 2001.

[CN18] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, « Largeur de raie des diodes laser DBR à deux sections à puits quantiques – influence des variations du paramètre α de Henry », 21^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2002, Dijon 23-25 septembre 2002, pp. 289-291.

[CN19] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET, H. SILLARD, **Z. TOFFANO** « Contrôle spectral rapide et précis des diodes laser accordables pour transmission DWDM par fibre optique », 21^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2002, Dijon 23-25 septembre 2002, pp. 292-294.

[CN20] **Z. TOFFANO**, A. GHOLAMI, A. DESTREZ , M. PEZ, G. BARBARY « Modules optoélectroniques parallèles VCSEL : caractérisations et simulations comportementales », 22^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2003, Valence, 12-14 Novembre 2003, pp. 387-389.

[CN21] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET, **Z. TOFFANO**, « Variation de la largeur de mode et du paramètre a de Henry dans les structures diode laser DBR à deux sections à puits quantiques accordables à large bande », 22^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2003, Valence, 12-14 Novembre 2003, pp. 535-537.

[CN22] J. MAUFOY, M. GRÜN, **Z. TOFFANO**, D. WOLFERSBERGER, A. DESTREZ, « Analyse du chaos dans les solitons photoréfractifs », 4^{ème} Colloque sur le Chaos Temporel et le Chaos Spatio-Temporel, Rouen 15 & 16 décembre 2003, pp. 51-56.

[CN23] P. DESGREYS, **Z. TOFFANO**, M. KARRAY, J.J. CHARLOT, « Modèle Multidomaine et Générique sur les données constructeur d'une Barrette de VCSELs », JSF03, Tozeur Tunisie, 20-22 décembre 2003.

[CN24] J.M. CAMPOS, A. DESTREZ, J. JACQUET, **Z. TOFFANO**, H. SILLARD, « Analyse spectrale ultra rapide des diodes laser accordables dans les liaisons DWDM », Colloque interdisciplinaire en instrumentation, C2I 2004, Paris janvier 2004, pp. 91-98.

[CN25] A. GHOLAMI , **Z. TOFFANO**, A. DESTREZ, P. DESGREYS, M. KARRAY, « Modélisation multi-technologique de modules optoélectroniques VCSEL pour communications courte-distance haut-débit », 23^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2004, ENST Paris, 25-27 Octobre 2004, pp. 76-78 .

[CN26] A. DESTREZ, J.M. CAMPOS, **Z. TOFFANO**, J. JACQUET, « Caractérisation spectrale ultra-rapide de diodes laser », 23^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2004, ENST Paris, 25-27 Octobre 2004, pp. 292-294.

[CN27] M. GRÜN, J. MAUFOY, D. WOLFERSBERGER, A. DESTREZ, **Z. TOFFANO**, « Modélisation et caractérisation d'un chaos de solitons photoréfractifs », 23^{èmes} Journées Nationales d'Optique Guidée - JNOG'2004, ENST Paris, 25-27 Octobre 2004, pp. 209-211.

3.5 Revues Supélec

[RS1] Alain DESTREZ, **Zeno TOFFANO**, « Caractérisations des lasers à semi-conducteurs pour transmissions par fibres optiques », Flux, revue Association Supélec, n°172, décembre 1995, pp.32-34

[RS2] Alain DESTREZ, **Zeno TOFFANO**, « Caractérisation et modélisation des sources laser pour télécommunications optiques », Revue Recherche et Relations Industrielles à Supélec, 2000 pp. 98-99.

[RS3] **Zeno TOFFANO**, « Une nouvelle génération d'ingénieurs entrepreneurs à Supélec », Flux, revue de l'association Supélec, n°214, mai 2001, pp.14-15

[RS4] Alain DESTREZ, **Zeno TOFFANO**, « Bande passante de transmission des fibres optiques plastique », Revue Recherche et Relations Industrielles à Supélec, 2002 pp. 94-95.

[RS5] Alain DESTREZ, **Zeno TOFFANO**, « Systèmes micro-optoélectroniques pour communications », Revue Recherche et Relations Industrielles à Supélec, 2004, pp. 103-104.

3.6 Thèse : RMN des conducteurs organiques (TMTSF)₂X, CEA Saclay

[TH0] « Raies RMN dans les métaux organiques: (TMTSF)₂(PF)₆ et (TMTSF)₂(ClO)₄ ; incommensurabilité de l'onde de densité de spin », Thèse soutenue par Zeno TOFFANO, Université Paris XI, 8 octobre 1985, devant le Jury : Prof. Jacques Friedel (Président), Dr. Denis Jerome (Rapporteur), Dr. Jean-Marc Delrieu (Directeur de thèse CEA), Prof. Jean Joffrin, Dr. Jean-Paul Pouget.

3.7 Ouvrage : « Optoélectronique, composants photoniques et fibres optiques »

[O] « Optoélectronique, composants photoniques et fibres optiques », par **Zeno TOFFANO**, Editions Ellipses, Paris Juillet 2001, 320 pages, ISBN : 2-7298-0703-9 .

8 Chapitres : I) p.11/ Optique ondulatoire électromagnétique ; II) p.50/ Interférences et fonctions optiques ; III) p.85/ Propriétés des photons ; IV) p.116/ Les lasers ; V) p.156/ Emetteurs optiques à semiconducteurs ; VI) p. 203/ Détecteurs optiques à semiconducteur ; VII) p. 230/ Guides et fibres optiques ; VIII) p. 270/ Transmissions optiques.

4 Itinéraire et résumé des travaux de recherche

Je me propose de décrire brièvement l'essentiel de mon activité de recherche entreprise depuis vingt ans. La recherche et d'une façon plus générale la connaissance ont toujours représenté pour moi une motivation et un attrait très importants que je me suis efforcé de mener avec enthousiasme. Mon parcours scolaire et universitaire est sans doute un peu atypique, car du fait du travail de mon père - diplomate de carrière italien - depuis mon enfance j'ai été habitué aux changements d'environnement : Angleterre, Yougoslavie, Libye, Italie, France en fréquentant des écoles différentes : maternelle anglaise, primaire italien et américain, lycée italien et université française.

Titulaire du baccalauréat scientifique obtenu au Lycée Scientifique Italien « Leonardo da Vinci » de Paris en 1978, ce lycée possédant une convention d'équivalence du baccalauréat italien avec le baccalauréat C français, je me suis orienté vers des études scientifiques à la faculté d'Orsay. A l'époque je ne connaissais pas l'Université d'Orsay, je pensais que cette université se trouvait près de l'ancienne Gare d'Orsay, non loin de mon domicile à Paris de l'époque. Mais voyant qu'il fallait prendre le metro puis le RER vers le sud de la région parisienne, j'ai réalisé que ce n'était pas si près que ça. Une réunion d'information en septembre 1978 m'a convaincu de m'inscrire. Il faut avouer que mon lycée ne disposait que de très peu d'informations sur le système d'éducation supérieure en France. La distinction entre Université et système des classes préparatoires et Grandes Ecoles n'était pas très claire pour moi à cette époque.

J'ai effectué tout mon cursus universitaire à la faculté d'Orsay de 1978 à 1985 : DEUG A PC, Licence et Maîtrise de Physique Fondamentale, DEA de Physique des Solides et thèse de III cycle au CEA de l'Orme des Merisiers.

J'ai effectué mon stage de DEA au Laboratoire LURE à Orsay sur la caractérisation des structures de bande des états de surface de AsGa par la technique de photoémission angulaire utilisant le rayonnement synchrotron. Lors de ce stage, je me suis trouvé confronté à l'ambiance des laboratoires de recherche utilisant de grands instruments, où se côtoient différentes équipes de recherche travaillant sur des expériences dans des domaines scientifiques variés.

Suite à une proposition du Professeur Jacques Friedel et de Denis Jérôme, en septembre 1983, j'ai entrepris une thèse sous la direction de Jean-Marc Delrieu, au Commissariat à l'Energie Atomique dans le Service de Physique des Solides et Résonance Magnétique de l'Orme des Merisiers. Grâce à une bourse d'allocataire de recherche du Ministère, j'ai pu débiter ce travail de thèse et pu m'exercer à une grande variété de techniques expérimentales : la Résonance Magnétique Nucléaire, l'électronique radio-fréquence, l'électronique de mesure, la programmation microinformatique à ses débuts (Apple II), les techniques basse température et les techniques du vide. Ces années de thèse ont été très positives, en effet du point de vue scientifique et technique ce fut une expérience très riche dans un domaine de recherche de pointe. J'ai participé à des discussions très franches, stimulantes et de haut niveau avec Jean-Marc Delrieu et Michel Roger. Plusieurs résultats nouveaux et précurseurs ont été obtenus et sont cités encore aujourd'hui dans le domaine des phases électroniques et magnétiques des conducteurs organiques [R1t], [R2t], [C1t]. A la fin de ma thèse soutenue en octobre 1985, j'ai continué durant quelques mois ce travail afin de participer à la rédaction d'un article [R3t].

En 1986, voulant élargir mon horizon à des domaines liés aux technologies appliquées de l'électronique, j'ai suivi une formation à Supélec dans le cadre du programme « Filière Electronique » afin de préparer un diplôme de spécialisation en « Systèmes Electroniques ». J'avais obtenu pour cela une bourse du Conseil Général de l'Essonne. Cette formation très complète et solide tant d'un point de vue théorique que pratique m'a permis d'acquérir une maîtrise dans les technologies électroniques et informatiques.

Début 1987, j'ai effectué un séjour au MIT (Cambridge Massachusetts) où j'ai entrepris quelques développements théoriques sur le comportement des électrons à des vitesses relativistes dans des diélectriques. En collaboration avec Frédéric Hartemann, ancien camarade à Orsay, ces travaux se sont poursuivis en marge de mon activité principale et plus concrètement lors d'un deuxième séjour (juillet-août 1994) en Californie [R4p], [R11p].

Sur proposition d'Yves Tanguy et François Mesa, j'ai accepté un poste d'enseignant-chercheur - à l'époque sous la dénomination Ingénieur - au Service Radioélectricité et Electronique de Supélec en mai 1987. J'ai entrepris une activité de recherche et d'enseignement au sein de ce service dirigé successivement par François Mesa et Gérard Attal. Le domaine du service, se situant historiquement autour des transmissions et de l'électronique, est actuellement axé sur les télécommunications sous la direction de Hikmet Sari. Je fais partie de l'équipe micro-ondes et optoélectronique composée d'enseignants-chercheurs, de thésards et stagiaires.

Mon centre d'intérêt se situe dans l'optoélectronique orientée vers les télécommunications optiques. L'activité en optoélectronique a débuté dans notre service dans les années 80 grâce à François Mesa et Jean Arnaud, et poursuivie par la suite par Alain Destrez. J'ai rejoint cette équipe dès mon recrutement en 1987.

La plupart des recherches présentées ici ont été faites en association avec Alain Destrez, composant ainsi le « binôme de l'optoélectronique » du service. D'autres relations de recherche se créent à l'occasion de travaux de thèse, de stages et de projets d'étudiants ou en collaboration avec des chercheurs de laboratoires de recherche universitaires et industriels.

Mon thème principal de recherche a porté sur la modélisation et la caractérisation de sources laser à semiconducteurs pour transmission par fibre optique. Cette activité a débuté à l'occasion de différents marchés d'études avec France Telecom CNET de Lannion sous l'impulsion de Christain Boisrobert et Irène Joindot. J'exposerai dans la suite de ce mémoire plus en détail cette activité avec ses développements vers la théorie du chaos, et vers la CAO en optoélectronique.

Par ailleurs l'enseignement constitue une partie importante de mon travail à Supélec. En effet, j'interviens dans les trois années tant au niveau de l'enseignement magistral, cours et TD, qu'au niveau pratique, études de laboratoire et projets. J'assure également des enseignements dans le cadre de la formation continue. J'interviens surtout dans mon domaine de compétence : l'optoélectronique et les transmissions optiques. Compte tenu de ma formation, j'interviens dans des enseignements de Physique : en électromagnétisme, physique des solides et physique quantique. J'exerce aussi une activité d'enseignement en électronique analogique et haute fréquence et en télécommunications. Il faut noter que l'optoélectronique, domaine pluridisciplinaire, fait appel à la physique, à l'électronique et au traitement des informations, ce qui rend cette activité très stimulante et implique des conséquences positives sur mon activité de recherche.

Depuis deux ans, j'assure le cours de Physique Quantique à Supélec et j'anime l'équipe pédagogique de cette activité d'enseignement pour les trois campus de Supélec. Cette matière très importante, a trouvé un regain d'intérêt à cause par exemple des avancées récentes dans le domaine des nanotechnologies ou de la théorie des ordinateurs quantiques avec des répercussions très importantes dans les futures technologies au cœur des objectifs de Supélec. Ma recherche future sera sûrement motivée par ces développements.

J'ai rédigé plusieurs documents pédagogiques en relation avec mes cours dans le domaine de l'optique, des composants optoélectroniques et des télécommunications par fibre optique. J'en ai fait une synthèse avec des approfondissements dans un livre paru en juillet 2001, « Optoélectronique, composants photoniques et fibres optiques », dans la collection Technosup aux éditions Ellipses [O].

A Supélec j'ai aussi eu des responsabilités dans la valorisation de projets innovants pendant la période faste des start-ups (1999-2002). J'ai pu coordonner les initiatives d'étudiants qui souhaitaient valoriser des projets technologiques en relation avec les spécialités de Supélec.

Je voudrais, à présent, résumer les différentes étapes de ma recherche. Le travail à la fois théorique et expérimental sur les lasers à semiconducteurs a constitué la partie principale de mon activité au sein du service Radioélectricité et Electronique. En outre je me suis occupé d'autres sujets dans le cadre des communications optiques et de sujets plus théoriques.

La variété et l'abondance des différentes activités de recherche, d'encadrement, et d'enseignement, dont il sera question ci-dessous sont, en fait, l'illustration d'un travail qui s'écoule sur une longue période.

J'ai commencé l'activité de recherche à Supélec en 1987 en m'occupant de l'étude du canal de transmission par voie optique infra-rouge en espace libre pour les applications dans le domaine de l'automobile dans le cadre d'un projet européen, PROMETHEUS PROCOM [CI3]. Sur ce même thème, j'ai pris en charge la recherche pour Supélec, comme sous-contractant de la société VALEO, sur un système de balise infra-rouge dans le cadre du projet européen DACAR DRIVE. J'ai été invité à la conférence générale DRIVE à Bruxelles en 1991 pour présenter les travaux. [CI6], [CI7]. Pendant ce travail, j'ai participé à de nombreuses réunions en Europe chez les partenaires industriels et académiques des consortiums.

J'ai participé à un premier marché d'études du Centre National d'Etudes en Télécommunications CNET de Lannion de France Télécom, sur l'interprétation du bruit modal dû aux lasers à semiconducteurs dans les fibres multimodes par l'étude de l'évolution du spectre optique en fonction de différents paramètres : le courant d'injection, le taux de rétroaction optique et la modulation [CI2], [CN1]. A cet égard, j'ai orienté la recherche de Hao Ding en cours de thèse sur l'étude par simulation de l'évolution des spectres multimodes des laser à semiconducteurs à cavité Fabry-Perot [CN2].

Lors d'une collaboration avec l'Université De La Salle (DLSU) de Manille, suite à la visite du Professeur Bernie Gumarang dans notre laboratoire en 1989, et mes deux séjours à DLSU de Manille, j'ai proposé le calcul des états de polarisation pour un polariseur à fibre optique monomode [CN3]. J'ai reçu une invitation à la conférence TELECOM Asia 1991 à Manille pour présenter les principales technologies liées aux fibres optiques [CI5].

Alain Destrez et moi avons réalisé un travail expérimental sur la mise au point de méthodes de mesure optoélectroniques originales sur les lasers à semiconducteurs. Ce développement a été poursuivi dans le cadre des marchés d'études avec le CNET. Des mesures en présence de rétroaction optique ont été effectuées. Le *chirp*, modulation de fréquence optique, statique et dynamique sous modulation a été mesuré et analysé, montrant l'influence de la fréquence de modulation et de la forme du signal modulant [R6], [CI8], [CI10], [CI12], [CN4], [CN14].

L'évolution de la cohérence d'un laser à semiconducteur par le passage au seuil a été analysée pour la première fois grâce à un dispositif expérimental d'interférométrie mis au point au laboratoire. J'ai développé une nouvelle méthode, à partir des largeurs spectrales mesurées, pour la détermination d'un coefficient important dans ces composants : le paramètre α de Henry [R5].

J'ai proposé l'étude des modèles nonlinéaires basés, sur l'équation de Fokker-Planck et sur l'analogie avec les transitions de phase (modèle de Landau) pour décrire le comportement continu au seuil. Ceci a constitué une partie du travail de thèse de Christelle Birocheau que j'ai co-encadré sur cette partie [R9], [CN5], [CN6].

La rétroaction optique étant critique dans le fonctionnement des lasers à semiconducteurs, nous avons abordé ce problème dans le cadre des marchés d'études CNET afin d'en étudier l'effet sur la largeur spectrale et sur les distorsions des transmissions analogiques par fibre optique [CN4]. Ce phénomène

essentiellement nonlinéaire nous a intéressé d'un point de vue fondamental et notamment par la mise en évidence d'aspects chaotiques. Christelle Birocheau a étudié un laser à semiconducteur en régime chaotique de *Coherence Collapse* et en présence de LFF, *Low Frequency Fluctuation*, près du seuil [CN5], [CN6].

En relation avec le travail sur la rétroaction optique et le chaos des lasers à semiconducteurs, j'ai effectué des recherches pour établir des analogies entre les oscillateurs laser et les oscillateurs électroniques présentant du chaos. Ceci a été motivé par deux raisons principales.

1) Il existe un grand nombre de types d'oscillateurs dont les équations sont analogues à celles des lasers tel que l'oscillateur de Van der Pol.

2) La mise en œuvre pratique est simple puisque basée sur des composants électroniques actifs et passifs disponibles dans le commerce.

Il est aussi très intéressant, par la technique du « calcul analogique », de pouvoir reproduire, à l'aide d'amplificateurs opérationnels, le comportement des équations différentielles non-linéaires. Grâce à notre expérience et à nos connaissances en électronique à Supélec, ces expériences ont été menées avec succès. J'ai proposé plusieurs sujets sur le chaos en électronique pour des projets d'étudiants à Supélec en I et II année. Ce travail se poursuit actuellement dans le cadre du Projet Pluri Formation sur le chaos et en association avec une équipe de Supélec du campus de Metz (voir plus loin).

Pour la thèse de Lotfi Hassine, dont j'étais directeur, nous avons développé un modèle du comportement du laser à semiconducteurs basé sur la méthode des séries génératrices de Volterra, les nonlinéarités du gain ayant été prises en compte d'une façon intrinsèque. Françoise Lamnhab-Laguarrigue, du Laboratoire des Signaux et Systèmes, spécialiste en analyse non linéaire, a contribué à ce travail. Les réponses aux différents ordres ont été obtenues simultanément et sous une forme analytique. L'apparition d'une composante continue due à la modulation a été établie, la dépendance du chirp avec le courant ainsi que les composantes à basse fréquence de la distorsion ont été étudiées. L'analyse du bruit a montré la dissymétrie du spectre de mode, la contribution prépondérante du bruit thermique à la largeur de raie et à la fonction de corrélation de l'intensité. [R8], [R9], [CI9].

J'ai ensuite élaboré une nouvelle méthode de mesure du facteur de compression de gain ε à partir de la composante continue modifiée sous modulation due aux nonlinéarités du laser à semiconducteur. Une expression simple du comportement de cette composante continue permettant d'extraire le paramètre de compression de gain ε , a été établie [R10], [CN9].

J'ai encadré un stage d'une année à Supélec de Raffaella Vinzio de Polytechnique Turin, et lui ai proposé un travail de modélisation sur les équations de continuité d'un laser à semiconducteur incluant les effets de LSHB, *Longitudinal Spatial Hole Burning*. Il s'agit de calculer les termes de distorsion d'ordre n et les termes d'intermodulation, permettant d'obtenir de manière analytique les paramètres CSO, *Composite Second Order*, et CTB, *Composite Triple Beat* utilisés caractérisant les transmissions analogiques par fibre optique de type CATV, *Common Antenna TV*. Les effets thermiques sur le chirp ont aussi été modélisés [R12].

J'ai ensuite repris les travaux sur l'analyse de la largeur spectrale d'un laser à semiconducteur au seuil par des expériences très précises sur deux lasers monomodes DFB possédant des paramètres α différents. J'ai entrepris une nouvelle analyse de la théorie de Fokker Planck par des expressions normalisées, puis caractérisé le comportement de type « transition de phase » du passage au seuil de la largeur de mode d'un laser à semiconducteurs [R11], [CI13].

J'ai orienté les recherches de thèse de Shirin Bozorgui vers les modèles statiques et dynamiques appliqués aux lasers multi-section de type DBR, *Distributed Bragg Reflector*. Un modèle de réseau de Bragg courbé a été utilisé afin d'améliorer l'accordabilité [CI11], [CI15]. J'ai enfin contribué à ses recherches sur l'inclusion des effets de la température [CI14].

Lors de l'utilisation de différents programmes commerciaux de simulation de systèmes optoélectroniques, j'ai observé que les modèles des composants, notamment les lasers à

semiconducteurs, sont décrits à partir d'un jeu de paramètres rarement accessibles par les utilisateurs. J'ai donc proposé une collaboration à Christine Lebrun, de la société IPSIS, responsable du projet optoélectronique pour le logiciel COMSIS, qui préparait une thèse à l'INSA de Rennes, afin de développer un modèle de laser à semiconducteurs à partir des paramètres système obtenus par les fiches constructeur ou par des mesures simples et accessibles [CI16], [CN13]. Le développement de ce travail a été un préambule à la mise en place du futur projet RMNT « SHAMAN » (voir plus loin).

Dans le cadre d'un marché d'études avec France Télécom proposé par Anne Talneau, au sein de Opto+, GIE entre France Télécom et Alcatel, j'ai entrepris une recherche par simulation sur le comportement thermique de lasers monomodes DFB et DBR en barrette pour transmission sur fibre optique par multiplexage dense en longueur d'onde DWDM. La mesure du *chirp*, à différentes fréquences de modulation et pour différentes températures sur une barrette de lasers DFB, a mis en évidence l'influence de la diaphonie (*crosstalk*) thermique entre lasers voisins. Dans le cadre de ce travail, j'ai aussi effectué une simulation thermique en 3D de la barrette de lasers afin de déterminer les paramètres géométriques critiques pouvant avoir une influence sur les variations de longueur d'onde, qui doivent rester inférieures à 0,8 nm (espacement entre canaux de 100 GHz) [CI17].

Au cours de la thèse de Juan-Manuel Campos sur l'étude de la largeur de mode dans les diodes laser DBR à puits quantiques à deux sections, un modèle basé sur la théorie multicorps dans les bandes d'énergie des structures à puits quantiques, a été décrit montrant l'influence de la densité de porteurs et de la fréquence d'oscillation sur le paramètre α de Henry. Ces paramètres modifient l'évolution de l'élargissement de mode [CN17], [CN18]. Les effets des bruits de grenaille et thermique dans une configuration d'utilisation réelle ont aussi été étudiés. Un analyseur de spectre adapté aux diodes laser DBR multi-section, basé sur un interféromètre à deux ondes, compact et ultra-rapide à grande accordabilité a été développé lors de ce travail de thèse [R15], [CI21], [CI22], [CN19], [CN24], [CN26].

Pour un contrat d'étude industrielle en relation avec un projet d'étudiants de 3^e année de l'option Electronique et Communications Numériques de Supélec, j'ai étudié une méthode de simulation de différentes configurations de liaisons DWDM sans amplificateur, avec une application aux liaisons optiques métropolitaines. A travers l'étude des normes en vigueur, une classification de composants nécessaires à une simulation exhaustive d'une liaison DWDM a été établie [CI18].

Les fibres optiques en polymère PMMA et leur utilisation dans des systèmes ont été des sujets de recherche pendant plusieurs années du laboratoire d'Optoélectronique du Service Radioélectricité et Electronique de Supélec. J'ai collaboré à plusieurs travaux sur ce sujet notamment dans le cadre de contrats ou de projets sur les méthodes expérimentales d'évaluation de la bande passante intermodale dans des nouvelles structures de fibre optique en plastique [CI19], [CN15], [CN16].

Après une gestation plutôt longue, le projet SHAMAN a été labellisé par le RMNT, Réseau national des Micro et Nanotechnologies, en janvier 2002. J'ai été le responsable technique pour Supélec au sein du consortium. Ce projet porte sur l'établissement d'une bibliothèque de modèles en langage haut niveau, VHDL-AMS, pour la simulation de modules optoélectroniques complexes MOEMS, *Micro Optical Electrical Modules*. Les modules optoélectroniques étant destinés à des communications haut débit (10 Gb/sec) courte distance pour applications bas-coût, ils comprennent des lasers à émission par la surface, VCSEL, *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*, en barrette, des nappes de fibres optiques multimodes et des photodiodes en barrette. La difficulté de la simulation réside dans la forte intégration des composants au sein d'un même module ce qui a pour conséquence de fortes interactions mécaniques et thermiques. Le comportement des lasers VCSEL incluant les effets thermiques, a été simulé par la théorie des équations de continuité. Ceci a été possible grâce à un nouveau modèle élaboré à partir du nombre de porteurs et de photons, la loi de la dépendance en température du courant de seuil, des paramètres du rendement de pente et du gain différentiel. Le comportement mesuré de la puissance de sortie en fonction du courant d'injection sur la gamme des températures de -40°/+85°, et aussi en fonction de la longueur d'onde, a été vérifié par les simulations. Deux stagiaires de Master, en 2002 Lazhari Khelifi de l'Ecole Supérieure des Télécommunications de

Tunis, en 2003 Stefan Dineci, de l'Institut Polytechnique de Bucarest, et en 2004 Manuel Lopes-Pino de l'Université de Valence en Espagne ont contribué à ce travail [R14], [RN16], [CI20], [CN23].

Ce sujet est l'objet d'une thèse en cours, sous ma direction, par Asghar Gholami. Les recherches se concentrent sur le caractère multimode des VCSEL. Elles sont menées expérimentalement et par simulation. L'influence du caractère multimode sur le diagramme de rayonnement et sur les conditions d'injection et par conséquent sur la bande passante des fibres optiques multimodes utilisées pour les communications optiques très courte distance, est particulièrement analysée. Un des objectifs de cette étude, faisant suite au projet RMNT SHAMAN, est d'optimiser, par le taux d'erreurs et le diagramme de l'œil, la qualité des futurs systèmes de transmission optique bas coût de type 10 Gigabit Ethernet. Il s'agit aussi de concevoir de nouvelles méthodes de modélisation des modules optoélectroniques complexes associés [CI23], [CI24], [CN20], [CN25].

Nous avons répondu en 2002 aux appels des programmes ASTRE (Action de Soutien à la Technologie et la Recherche en Essonne) du Conseil Général de l'Essonne et SESAME (Soutien aux Equipes Scientifiques pour l'Acquisition de Moyens Expérimentaux) de la Région Ile de France pour aider à la mise en place d'un système d'étude et d'évaluation de modules optoélectroniques très haut débit, (≤ 40 Gbit/s). Notre proposition a été retenue en 2003. Les équipements comprennent un DCA, *Digital Communication Analyser*, pouvant réaliser une caractérisation complète du « diagramme de l'œil » avec des tiroirs optoélectroniques spécialisés : 1) Pour les communications courte distance sur fibre optique multimode à une longueur d'onde de 850 nm et un débit jusqu'à 10 Gbit/s, 2) Pour les systèmes utilisant des fibres optiques monomodes à 1300 nm et 1550 nm à des débits jusqu'à 40 Gbit/s. Un analyseur de chirp complète le dispositif.

Dans le cadre d'Optics Valley, ce système étendra les possibilités de la plate-forme technologique spécialisée en « Métrologie, Caractérisation, Test », PRISME, Plateforme Régionale Ile-de-France Sud de Mesures et d'Expertises.

Supélec participe à travers notre laboratoire d'Optoélectronique, à cette plateforme en collaboration avec les partenaires au sein de l'Université Paris XI :, IEF et IUT, l'IOTA (Institut d'Optique Théorique et Appliquée), le LNE (Laboratoire National d'Essai), le Lycée Fresnel et THALES, en apportant une expertise en transmissions optiques haut débit, tant au niveau expérimental que sur le plan de la modélisation. Cette expertise concerne aussi bien l'aspect optique que l'aspect électronique haute fréquence et traitement du signal. Des équipements de très grande performance comme des analyseurs de spectre optique, des mesureurs de taux d'erreurs, des générateurs sont mis à notre disposition par Optics Valley. Ces équipements ont déjà été utilisés pour les caractérisations expérimentales effectuées à Supélec pour le projet RMNT SHAMAN [R15].

En 2003, en collaboration avec Alain Destrez et avec des enseignants chercheurs du campus de Metz de Supélec - Jean Maufoy et Delphine Wolfenberger et ensuite Marc Sciamanna - avec lesquels nous sommes associés au sein LMOPS (Laboratoire Matériaux Optiques Physique et Systèmes) nous avons initié un Projet Pluri Formation ayant comme objectif l'étude du chaos. Le but de ce projet est d'établir des modèles généraux utiles pour décrire tant le chaos spatial de solitons photoréfractifs que le chaos temporel des lasers et des oscillateurs électroniques [CN22], [CN27]. Actuellement, je m'intéresse aux phénomènes chaotiques dans les diodes laser en reprenant l'étude du comportement au seuil et le couplage de plusieurs lasers, notamment dans le cadre du travail de stage de Master de Cristina Ciochina de l'Institut Polytechnique de Bucarest.

5 Synthèse des recherches

5.1 Spectres des modes laser à semiconducteur de type Fabry-Pérot et DFB

5.1.1 Motivations

Les lasers à semiconducteurs suscitent un grand intérêt depuis des nombreuses années dans les transmissions par fibre optique ou la lecture et l'enregistrement optiques.

Les recherches portent principalement sur le développement de nouvelles structures et sur l'étude des propriétés des signaux optiques émis. Dans le domaine des télécommunications optiques, où les performances ne cessent d'augmenter, il faut disposer de sources de pureté spectrale importante, de stabilité avec la température, des rendements élevés, de puissances d'émission élevées, de grande bande passante de modulation et de la facilité d'intégration avec d'autres composants optiques et électroniques. Différentes technologies de lasers à semiconducteurs ont été proposées et réalisées au cours de ces années, j'en discuterais tout au long de ce mémoire.

Comme pour tout système physique la description du fonctionnement d'un laser à semiconducteurs doit pouvoir se baser sur des modèles physiques. Ceux ci sont principalement de deux types : les modèles microscopiques faisant appel à la physique semi-conducteurs et reliés aux constantes caractéristiques du matériau et les modèles phénoménologiques macroscopiques donnant une image du comportement du système à travers les caractéristiques de sortie.

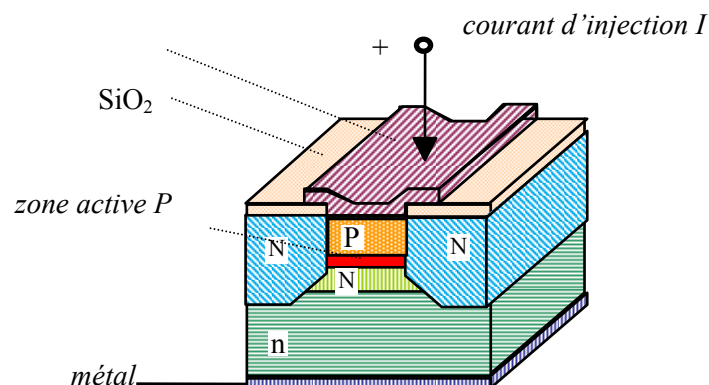


Fig 1. Exemple de structure d'un laser à semiconducteur de type Fabry-Pérot BH, Buried-Heterostructure, à guidage par l'indice.

5.1.2 Contexte au sein du laboratoire : marchés d'études France Télécom CNET Lannion [R6] , [CI2], [CN1].

L'activité de recherche sur les lasers à semiconducteurs a démarrée au Service Radioélectricité et Electronique de Supélec sous forme de marchés d'études avec le Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) à Lannion de France Télécom. J'ai participé activement à ces marchés d'études dès mon recrutement à Supélec. Le premier travail portait sur l'étude des lasers à semiconducteurs de première génération de type Fabry-Pérot multimodes et leur influence sur le bruit modal dans les transmissions sur des fibres optiques multimodes. Le bruit modal se caractérise par l'apparition d'inhomogénéités dans la structure des modes d'une fibre optique ce qui provoque une

grande fluctuation dans la dispersion intermodale et par conséquent dans la bande passante de transmission. Ceci constituait un problème pour les transmissions optiques à la longueur d'onde de 1300 nm pour la téléphonie plétyochrone PDH à 140 Mbit/s .

On a étudié les propriétés spectrales d'émission des sources afin de voir s'il existait une corrélation entre le caractère multimode longitudinal du laser et le bruit modal de la transmission. Par l'analyse de l'intensité de chaque mode on a pu montrer que lors du fonctionnement juste après le seuil d'oscillation du laser, où peu de modes sont excités, il existait une excitation sélective dans la fibre optique et donc une accentuation du bruit modal.

Hao Ding en thèse à l'époque a entrepris, dans le cadre de ce marché d'études, d'analyser le spectre multimode d'un laser Fabry-Pérot par un analyseur multicanal à l'aide d'un détecteur matriciel.

Une autre méthode d'analyse spectrale a ensuite été envisagée par l'utilisation d'un interféromètre de Fabry-Pérot confocal, développé par Patrick Juncar du BNM. Ainsi, après avoir été dispersé par moyen d'un réseau de diffraction, le spectre de chaque mode et son évolution avec le courant d'injection a été analysé. On a montré que la variation de la largeur spectrale de chaque mode était corrélée avec l'augmentation de bruit modal.

5.1.2.1 Modèle des équations de continuité des lasers à semiconducteur [TH1], [CN2].

Les modèles utilisés pour la description des caractéristiques des lasers multimodes sont les équations de continuité exprimées dans le cas d'un fonctionnement multimode en fonction des photons P_i de la phase ψ_i de chaque mode laser et des porteurs de charge N dans la zone active :

$$\frac{dP_i}{dt} = \beta_i D_i R(N) + \Gamma v_g g_i P_i - \frac{P_i}{\tau_{pi}} \quad (1) \quad \frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\alpha_i}{2} \left(\Gamma v_g g_i - \frac{1}{\tau_{pi}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{vol \cdot e} - R(N) - v_g \sum_{i=1}^M g_i P_i \quad (3)$$

$I(t)$ est le courant d'injection, e est la charge de l'électron, $R(N)$ le taux de recombinaison, Γ le facteur de confinement, v_g la vitesse de groupe. Pour chaque mode i , τ_{pi} est la durée de vie des photons, g_i le gain, β_i le facteur d'émission spontanée, D_i le facteur de forme des raies et α_i le facteur d'élargissement spectral de mode.

Le gain par mode g_i peut être exprimé sous une forme linéaire en fonction des porteurs N , il s'agit d'une approximation très employé pour le fonctionnement en oscillation avec le gain verrouillé donc avec des variations de N faibles. Pour rendre compte de la compression du gain on introduit le facteur de compression de gain par mode ε_i . On aboutit donc à une forme non linéaire du gain, bilinéaire, en fonction des porteurs et des photons.

$$g_i = a_i (D_i N - N_0) (1 - \varepsilon_i \cdot P_i) \quad (4)$$

a_i est le coefficient de gain différentiel et N_0 la densité de porteurs à la transparence.

Dans les équations décrites plus haut n'apparaissent pas les effets de dépendance spatiale des densités de porteurs et de photons considérés ici homogènes. Néanmoins dans certains cas les effets inhomogènes peuvent jouer un rôle important, je discuterais de leur effets pour les lasers à rétroaction distribuée monomodes DFB, *Distributed Feedback*, et pour les laser à émission par la surface VCSEL, *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*, à travers le phénomène de SHB, *Spatial Hole Burning*.

5.1.2.2 Dephasage et paramètre α

Le champ dans une cavité laser subit une amplification via le gain, des pertes et un déphasage. La constante de propagation complexe peut être exprimée par :

$$K_i = k_i + i \cdot \left(\frac{g_i - \tau_{pi}^{-1} \cdot \nu_g^{-1}}{2} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_i} (n_0 + n' - i \cdot n'') \quad (5)$$

$n' - in''$ représentent les partie réelle et imaginaire respectivement de l'indice de réfraction de la cavité laser près de la résonance, n_0 est l'indice de groupe moyen du matériau semiconducteur à la longueur d'onde de travail. Les indices sont liés à la constante diélectrique ε et par conséquent à la susceptibilité χ :

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = n^2 = (1 + \chi) \quad \text{et} \quad \chi = \chi_0 + \chi' - i\chi'' \quad (6)$$

Dans tout système dissipatif il existe une dépendance de l'absorption, partie imaginaire de la susceptibilité χ'' , avec la dispersion, partie réelle de la susceptibilité χ' . Dans les cas linéaires ceci se traduit par les relations bien connues de Kramers-Kronig, appelées aussi Bayers-Bode en théorie des circuits.

$$\chi'(\nu) = \frac{1}{\pi} \text{VP} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi''(\nu')}{\nu' - \nu} d\nu' \quad \text{et} \quad \chi''(\nu) = \frac{1}{\pi} \text{VP} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi'(\nu')}{\nu' - \nu} d\nu' \quad (7)$$

dans les laser à semiconducteurs, pour une fréquence donnée, la relation entre les les variations de la partie réelle et imaginaire de l'indice sont représentées par le paramètre de Henry α .

$$\delta n' = \alpha. \delta n'' \quad (8)$$

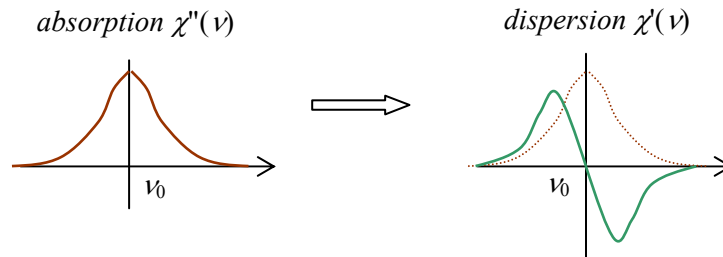


Fig. 2 Forme des courbes d'absorption et de dispersion.

5.1.3 Le comportement spectral d'un laser à semiconducteurs au voisinage du seuil

5.1.3.1 Largeur spectrale pour un laser à semiconducteur en dessous et au dessus du seuil.

L'idée qui consiste à assimiler le comportement d'un laser à semiconducteurs en dessous du seuil d'oscillation avec celui d'une diode électroluminescente DEL, incohérente et au dessus avec celui d'une source parfaitement cohérente est trop simple, en réalité il existe une progression continue de la cohérence à travers le seuil.

Un laser à semiconducteur présente des mécanismes propres d'élargissement spectral $\Delta\nu$ plus importants que ceux des lasers dits classiques, comme par exemple les lasers à gaz tel que le laser He-Ne. Cet élargissement s'avère pénalisant dans les transmissions optiques à cause la dispersion chromatique des fibres optiques qui est proportionnelle à cet élargissement.

D'un point de vue physique ce type d'élargissement est très intéressant, en effet, comme je le montrerai par la suite, le laser à semiconducteur présente des comportements très proches de ceux décrits par la théorie de l'élargissement homogène avec des formes de spectre presque Lorentziennes, ce qui n'est pas le cas des autres lasers classiques où les élargissements dits techniques de type mécanique ou thermique masquent le caractère homogène et se caractérisent par des élargissements de type Gaussien.

La théorie de l'élargissement spectral homogène remonte aux pionniers du laser, notamment dans l'article séminal en 1958 sur le MASER, *Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation*, par Arthur L. Schawlow et Charles H. Townes [B1] où une équation avait été établie pour l'élargissement spectral donnant une dépendance avec l'inverse de la puissance émise. Cette loi dite de Schawlow-Townes n'est valable qu'en dessous du seuil d'oscillation. Melvin Lax [B2] en 1967 a montré qu'au dessus du seuil le coefficient de proportionnalité est réduit d'un facteur deux, cette deuxième loi est appelée la loi de Schawlow-Townes modifiée. En exprimant l'élargissement spectral en fonction de la fréquence ν et de la bande passante de la cavité vide $\Delta\nu_c$ et de la puissance émise Φ on obtient les deux lois [O chap IV] :

$$\Delta\nu_{<} = 2\pi \frac{h\nu}{\Phi} (\Delta\nu_c)^2 \text{ au-dessous} \quad (9) \quad \text{et} \quad \Delta\nu_{>} = \pi \frac{h\nu}{\Phi} (\Delta\nu_c)^2 \text{ au-dessus} \quad (10)$$

Le comportement au dessus du seuil est dû au mécanisme non-linéaire de verrouillage du gain typique d'un oscillateur. Le gain fixe l'amplitude du champ laser et la phase seule peut fluctuer. Par contre en dessous du seuil les fluctuations d'amplitude sont aussi possibles.

Dans un laser à semiconducteurs, l'effet laser a lieu en général en dessous du pic d'absorption interbande. Quand l'intensité du champ varie en réponse au changement de la densité électronique par le courant d'injection, pour revenir à un point d'équilibre, l'indice change à la fois dans sa partie imaginaire, absorption liée à la puissance, et dans sa partie réelle, dispersion liée à la phase. Cet effet est quantifié par un paramètre empirique, constant en première approximation, correspondant au rapport des variations des indices réel et imaginaire, comme exprimé en (8). il s'agit du célèbre paramètre α de Henry ou de couplage phase-intensité, mis en évidence par Charles H. Henry en 1983 [B3], qui avait travaillé aux AT&T Bell Laboratories entre autres avec Melvin Lax.

Une des conséquences de α est le phénomène de *chirp* qui induit une modulation de fréquence lors d'une modulation du courant d'injection du laser.

Le rôle de α sur la largeur spectrale de mode fait augmenter l'écart quadratique moyen des fluctuations de phase d'un facteur $(1 + \alpha^2)$. Compte tenu des valeurs typiques de α , on a une augmentation de l'ordre d'un facteur 10. La largeur spectrale de mode s'exprime alors par [O chapV] :

$$\Delta\nu = \frac{R_{sp}}{4\pi P} (1 + \alpha^2) = \frac{n_{sp} h\nu \alpha_m \nu_g^2}{8\pi \tau_p \Phi} (1 + \alpha^2) \quad (11)$$

R_{sp} est le taux d'émission spontanée, n_{sp} le facteur d'émission spontanée ou d'inversion, P le nombre de photons du mode dans la cavité et α_m les pertes des miroirs de la cavité (en cm^{-1}).

Dans les lasers classiques, non à semiconducteurs, le phénomène de *pulling* impose en général une fréquence d'oscillation laser différente de la fréquence d'un des modes de la cavité vide, et ceci à cause du mécanisme général reliant la partie réelle et la partie imaginaire de la susceptibilité χ , voir eq. (7). Dans ce cas le phénomène est quantifié par le paramètre de désaccord, *detuning*, δ , qui correspond à la différence entre la fréquence de la cavité et la fréquence de transition atomique divisé par la largeur spectrale de la transition. Le rôle de δ en ce qui concerne la dépendance de l'élargissement spectral de mode homogène est formellement équivalent à celui du facteur α dans les lasers à semiconducteur. En suivant les travaux de H. Risken [B4] on peut montrer que le facteur d'augmentation asymptotique au-dessus de seuil de la largeur spectrale varie en $(1 + \delta^2)$, ce fait transparaît également dans l'article de Melvin Lax [B2] mais d'une façon moins explicite.

5.1.3.2 Nouvelle méthode de détermination du facteur d'élargissement de mode α . [R5], [R6].

Le comportement de la largeur spectrale à travers le seuil d'un laser homogène a été très peu étudié dans les lasers classiques, ceci à cause des élargissements techniques d'origine mécanique ou thermique qui masquent en général l'élargissement homogène. Dans ce genre de laser cet élargissement est très faible, typiquement de qq. Hz, du fait des longueurs de cavités importantes induisant une largeur de cavité vide, $\Delta\nu_c$ beaucoup plus faible que dans les lasers à semiconducteurs. A ma connaissance il n'existe qu'une seule expérience, en 1972, effectuée par H. Gerhardt en analysant la fonction de visibilité d'un interféromètre à deux ondes [S5], qui a montré expérimentalement la différence d'un facteur 2 dans les pentes de Schawlow-Townes au-dessous et au-dessus du seuil. Pour un laser classique avec *detuning* significatif il n'y a pas eu à ma connaissance des mesures permettant de vérifier la loi de Schawlow-Townes modifiée.

C'est en lisant très attentivement l'article de Melvin Lax, [B2], qu'on peut établir une équivalence entre son approche et le résultat de Henry, $(1 + \alpha^2)$. Je voulais vérifier ce résultat par une expérience sur un laser à semiconducteur afin de prouver l'existence d'une différence entre les pentes de Schawlow-Townes au-dessous et au-dessus du seuil. Il y'avait aussi une autre idée sous-jacente : celle de trouver une nouvelle méthode de mesure du paramètre α dans un laser à semiconducteur, pouvant être confrontée avec les valeurs trouvées par d'autres méthodes comme celle dite de Hakki et Paoli [CN1], ou les méthodes dynamiques basées sur les rapports de modulation FM et AM [B6].

Avec Alain Destrez en utilisant les dispositifs expérimentaux développés pour les recherches en collaboration avec le CNET Lannion, on a effectué la mesure sur un laser à semiconducteur de type Fabry-Pérot BH émettant à 1310 nm dont le fonctionnement restait monomode juste au dessus du seuil. La dynamique de variation de la largeur spectrale était importante, de plusieurs dizaines de GHz sous le seuil à environ 100 MHz au dessus. Ceci nous a obligés à utiliser deux interféromètres : un interféromètre de Michelson dans la région sous et au voisinage du seuil et un interféromètre de Fabry-Pérot au voisinage et au-dessus du seuil. La zone du seuil mesurée par les deux dispositifs a permis de recouper les résultats. Les résultats ont effectivement montré la présence de deux pentes dans les courbes de la largeur spectrale de mode en fonction de l'inverse de la puissance émise. Par l'interprétation donné plus haut le rapport des deux pentes a été identifié avec $(1 + \alpha^2)/2$ permettant d'extraire α . Pour le laser testé avec un comportement monomode on a trouvé une valeur de 2,4 tout à fait compatible avec les valeurs typiques, voir figure 4. Ce résultat a fait l'objet d'une publication dans *Electronics Letters* [R5], les méthodes expérimentales ont été décrites dans *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [R6].

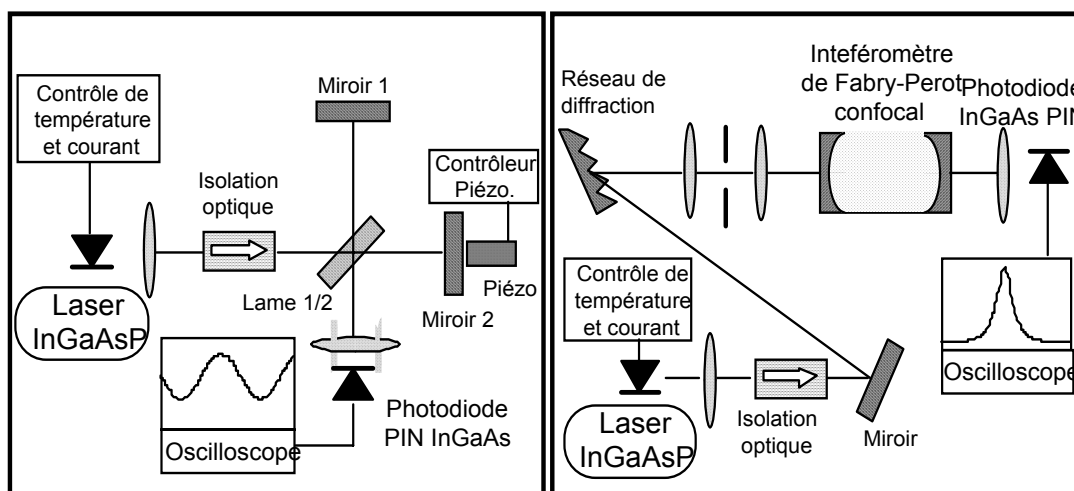


Fig. 3 Schémas des méthodes de mesure de la largeur de mode d'un laser à semiconducteur au voisinage du seuil par interféromètres de Michelson et de Fabry-Pérot.

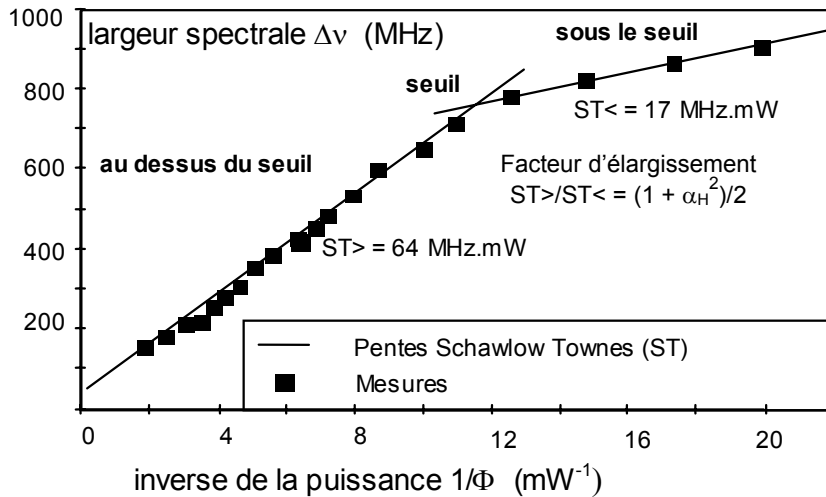


Fig 4. Mesures de largeur de mode en dessous et au dessus du seuil d'un laser à semiconducteur donnant un facteur $\alpha_H \approx 2,4$.

Quelques mois après ces travaux, Rongqing Hui [B7], en thèse au Politecnico Turin a entrepris des mesures en faisant une étude plus fine de la zone du seuil et a confirmé ce comportement par une autre méthode de mesure. En poussant l'interprétation plus loin par l'utilisation du formalisme de Fokker Planck dans la zone du seuil, ces travaux ont montré une transition non-monotone en fonction du paramètre α . Nous y reviendrons, notamment afin de porter une amélioration au modèle. J'ai pu discuter avec R. Hui et avec son responsable de thèse le Professeur Ivo Montrosset sur ce sujet à Turin en 1993.

5.1.3.3 Méthodes de modélisation du passage au seuil : thèse de Christelle Birocheau. [TH2], [R9].

Pendant le travail de thèse de Christelle Birocheau, j'ai orienté une partie de ses recherches vers la caractérisation fine du comportement à travers le seuil d'un laser à semiconducteur, notamment par la modélisation du phénomène. Trois modèles issus du traitement des lasers classiques ont été investigués et adaptés au cas du laser à semiconducteur : le modèle de la réponse linéaire appliquée à l'équation de Van der Pol ; le modèle des transitions de phase de Landau et la méthode de l'équation de Fokker Planck. Les modèles de Landau, dit aussi de transition de phase, et de Fokker-Planck incluent intrinsèquement les fluctuations et sont donc physiquement plus réalistes, et c'est le modèle de Fokker-Planck qui s'est avéré le plus proche des résultats expérimentaux. Cette étude a fait l'objet d'un article de revue dans les *Annales des Télécommunications* [R9].

Christelle Birocheau a aussi investigué le comportement au seuil en présence de rétroaction optique, dont l'étude était une des motivations de sa thèse. Ce sujet a été abordé lors d'une autre collaboration avec le CNET Lannion où l'on devait évaluer l'effet de la rétroaction optique sur le spectre des laser à semiconducteurs dans les systèmes de télécommunications optiques analogiques sur câble de type CATV où la rétroaction optique était responsable de distorsions supplémentaires.

Un laser à semiconducteur soumis à une rétroaction optique modifie les conditions d'oscillation et par conséquent les propriétés au seuil d'oscillation. Dans certaines conditions de réinjection pour le niveau énergétique et la phase, une importante variation de la largeur spectrale peut être obtenue. Notamment des régimes chaotiques sont observés dans le régime de perte de cohérence, *coherence collapse*, j'aborderais ce point plus loin lors des considérations sur le chaos.

L'application de la théorie de Landau aux diodes laser nous a permis de calculer la largeur spectrale de façon continue au voisinage du seuil avec ou sans rétroaction optique [CN6].

5.1.3.4 Synthèse de l'analyse, méthode de Fokker Planck simplifiée et extraction de paramètres internes. [R12], [CI13], [CN11].

Après les premiers travaux sur les comportements de Schawlow-Townes et le travail de thèse de Christelle Birocheau, j'ai repris cette étude afin d'en faire une synthèse en effectuant des mesures sur d'autres lasers, cette fois-ci de type monomode DFB, et en reprenant l'analyse théorique pour la rendre plus cohérente. Une des motivations était de retrouver les résultats asymptotiques au-dessous et au-dessus du seuil par la méthode des équations de continuité [B8]. J'ai établi les équations de continuité d'une façon générale en incluant le régime amplificateur au-dessous du seuil, par l'introduction du terme de gain variable $G(N)$, fonction du nombre de porteurs, et en introduisant un terme de diffusion de phase supplémentaire, $D_{\phi\phi}$, qui tient compte du gain non verrouillé au-dessous du seuil dans le régime d'amplification.

Dans le modèle des équations de continuité incluant les forces de Langevin [O chap V], [R12], la largeur spectrale est obtenue à partir de la densité spectrale de bruit de fréquence $S_f(\omega)$. La largeur spectrale s'exprime en fonction de la densité spectrale de bruit de fréquence en continu $S_f(0)$:

$$\Delta\omega = S_f(0) = \Delta\omega_\phi + \frac{\alpha^2 G_N^2}{2} \cdot \frac{R_{sp}^2 [R_{sp}P + (N/\tau_n)] + G^2 R_{sp} P^3 + G(2R_{sp})^2 P^2}{\{R_{sp}[(1/\tau_n) + G_N P] + GP[G_N P + 2(R_{sp}/N)]\}^2} \quad (12)$$

$$\text{avec} \quad \Delta\omega_\phi = 2D_{\phi\phi} = \frac{R_{sp}}{2P} \cdot \left(1 + \frac{e}{\tau_n G_N} \cdot \frac{dG}{dI}\right)$$

G_N est le taux de gain différentiel (s^{-1}), G le taux de gain, τ_n le temps de recombinaison des porteurs, R_{sp} le taux d'émission spontané, I le courant d'injection et e la charge de l'électron.

Dans (12) en faisant tendre $P \rightarrow 0$, au-dessous du seuil, et $P \rightarrow \infty$, au-dessus du seuil et en tenant compte du comportement du gain : $dG/dI \rightarrow \tau_n G_N / e$, bien au-dessous du seuil et, à cause du verrouillage du gain, $dG/dI \rightarrow 0$ au-dessus du seuil, on obtient les largeurs spectrales asymptotiques avec les pentes caractéristiques de Schawlow-Townes :

$$\text{au-dessous du seuil} \quad \Delta\omega_< = \frac{R_{sp}}{P} \quad \text{au-dessus du seuil} \quad \Delta\omega_> = \frac{R_{sp}}{P} \cdot \frac{(1 + \alpha^2)}{2} \quad (13)$$

J'ai aussi exprimé les expressions analytiques normalisées de l'équation de Fokker-Planck, valables dans la région du seuil, pour l'intensité du champ et pour la largeur spectrale de mode. Il s'agit d'une méthode générale. Ces expressions normalisées sont exprimées en incluant le paramètre de Henry α , en fonction d'un seul paramètre variable : le paramètre de pompe normalisé a . La conversion vers les paramètres réels, le courant d'injection, la puissance optique et la largeur spectrale se fait par les paramètres internes caractéristiques du laser à semiconducteur : le taux de gain différentiel G_N , le temps de recombinaison des porteurs τ_n , le temps de vie des photons τ_p et le facteur d'émission spontanée n_{sp} . Par ajustement des expressions théoriques aux courbes expérimentales on peut extraire ces quantités importantes. Je tiens à faire remarquer que cette méthode de conversion apporte une amélioration par rapport à celles proposées précédemment [R9], [B7] où les facteurs de conversion dépendaient de l'intensité de pompe via le gain variable en dessous du seuil. Ici l'effet de la pompe est entièrement pris en compte dans le paramètre de pompe normalisé a . Il faut remarquer que cette approche est en accord avec les travaux séminaux sur les bruits dans les lasers à semiconducteur de Y. Yamamoto [B9].

Le modèle proposé s'inspire du traitement des lasers classiques de H. Risken [B4]. L'équation de Fokker-Planck doit être modifiée de façon à tenir compte du facteur de Henry α , ou de façon équivalente, comme je l'ai souligné précédemment du *detuning* δ . Je vais donner ici une forme analytique de la puissance optique et de la largeur spectrale. Le traitement est effectué en grandeurs

normalisées. L'amplitude complexe normalisée u du champ d'un laser monomode à élargissement homogène vérifie une équation de Langevin, qui est en fait l'équation de Van der Pol avec un terme de bruit, cette équation reste valable aussi dans la région du seuil :

$$\frac{du}{dT} - (1 + i\alpha) \cdot (a - |u|^2) \cdot u = \Gamma(T) \quad \text{avec} \quad \langle \Gamma(T) \Gamma^*(T') \rangle = 4\delta(T-T') \quad \text{et} \quad \langle \Gamma(T) \Gamma(T') \rangle = 0 \quad (14)$$

T est le temps normalisé, a l'intensité normalisée de pompe et $\Gamma(T)$ est la force de Langevin normalisée représentant les fluctuations. La fonction d'autocorrélation du champ s'exprime par :

$$\langle u(T) u^*(0) \rangle = \langle |u|^2 \rangle \exp[-\Delta\varpi |T| - i \delta\varpi T] \quad (15)$$

où $\Delta\varpi$ est la largeur spectrale normalisée et $\delta\varpi$ la déviation de fréquence normalisée. Ces quantités seront calculées par la méthode de l'équation de Fokker-Planck.

L'équation de Fokker-Planck régit les fonctions de distributions statistiques comme la densité de probabilité instantanée du champ laser $W(u, T)$, l'équation a la forme suivante :

$$\frac{dW}{dT}(u, T) = L_{FP}(u) \cdot W(u, T) \quad \text{avec l'opérateur} \quad L_{FP}(u) = -\frac{d}{du} D_1(u) + \frac{d^2}{du^2} D_2(u) \quad (16)$$

$D_1(u)$ est appelé le terme de dérive et $D_2(u)$ le terme de diffusion. L'intensité du champ normalisé $g(a) = \langle |u|^2 \rangle$ est exprimé en fonction du paramètre de pompe normalisé a par [B4]:

$$g(a) = a + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\exp(-a^2/4)}{1 + \operatorname{erf}(a/2)} \quad (17)$$

Cette relation est continue au seuil, pour $a = 0$. Il est à remarquer que le paramètre normalisé de pompe est une fonction linéaire du courant d'injection. La largeur spectrale normalisée continue au seuil, incluant le paramètre α , peut être obtenue par une analyse variationnelle de l'équation de Fokker-Planck :

$$\Delta\varpi(a, \alpha) = \lambda_{Rmin}(a) (1 - \alpha^2) + \frac{2\alpha^2}{g(a)} \quad (18)$$

où $\lambda_{Rmin}(a)$ est la partie réelle de la valeur propre minimale de l'équation de Fokker-Planck avec $\alpha = 0$. J'ai développé une expression analytique approchée de cette quantité :

$$\lambda_{Rmin}(a) = 2\xi(1+\xi^2) + a\xi^2 + 2(1+\xi^2) \left[\xi + \frac{1}{g(a+2\xi)} \right] \quad \text{avec} \quad \xi(a) = \begin{cases} -1/4 \exp(-|a-2|/20) & a < 2 \\ -1/4 \exp(-|a-2|/10) & a > 2 \end{cases} \quad (19)$$

où le paramètre critique ξ de la transition est obtenu par minimisation en fonction du paramètre de pompe a , et diminue asymptotiquement en dehors de la région du seuil. Les comportements asymptotiques de l'intensité normalisée, de la valeur propre et de la largeur spectrale normalisée sont :

Au-dessous du seuil ($a < 0$ pour $a \rightarrow -\infty$) :

$$g(a) \rightarrow 2/|a| \quad ; \quad \lambda_{Rmin}(a) \rightarrow 2/g(a) \rightarrow |a| \quad ; \quad \Delta\varpi(a, \alpha) g(a) \rightarrow 2 \quad (20)$$

Au-dessus du seuil ($a > 0$ pour $a \rightarrow +\infty$) :

$$g(a) \rightarrow a \quad ; \quad \lambda_{Rmin}(a) \rightarrow 1/a \quad ; \quad \Delta\varpi(a, \alpha) g(a) \rightarrow (1 + \alpha^2) \quad (21)$$

On vérifie en utilisant les équations (20) et (21) les comportements asymptotiques équivalents à (11) et (13). Les variations de ces quantités en fonction du paramètre de pompe sont présentés sur la figure 5 :

L'interprétation physique de ce phénomène n'est pas aisée. Il s'agit en fait d'un phénomène de transition de phase entre l'état incohérent sous le seuil et l'état cohérent au-dessus. Les phénomènes de transition de phase sont des phénomènes complexes non-linéaires et peuvent être caractérisés par des exposants critiques. J'ai pu extraire un paramètre ξ , à partir de la largeur spectrale normalisée qu'on peut assimiler à un paramètre critique. Mais ici à cause du paramètre α non nul on ne peut pas assimiler la transition au seuil du laser à semiconducteur avec une transition de phase du deuxième ordre, continue comme celle qu'on rencontre par exemple dans les supraconducteurs et qui a été souvent utilisé pour modéliser le comportement d'un laser [B11], [B23].

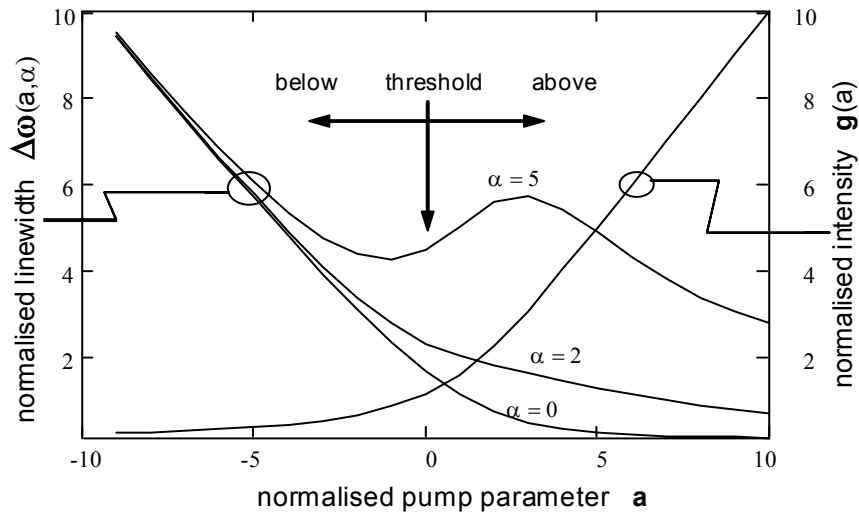


Fig. 5 Largeur de mode et intensité normalisée calculée par la méthode de Fokker-Planck pour un laser au passage au seuil en fonction du paramètre de pompe normalisé a pour différentes valeurs du paramètre α .

Afin d'obtenir une expression exploitable dans le cas d'un laser à semiconducteurs il faut rénormaliser les quantités précédentes : paramètre de pompe a , intensité normalisée g et largeur spectrale normalisée $\Delta\varpi$, ce qui conduit à :

$$a = \frac{I - I_s}{e} \left(\frac{2G_N\tau_n\tau_p}{R_{sp}} \right)^{1/2} ; \quad P = \left(\frac{n_{sp}}{2G_N\tau_n} \right)^{1/2} g(a) ; \quad \Delta\nu = \frac{\Delta\varpi}{2\pi} \left(\frac{G_N\tau_n}{2n_{sp}} \right)^{1/2} R_{sp} \quad (22)$$

Les expressions (22) conduisent à une relation entre la largeur de mode $\Delta\nu$ et le courant d'injection I via les relations (18) et (19), cette relation peut être comparée aux valeurs mesurées. Le nombre de photons P permet de remonter à la puissance émise Φ par la pente du laser η_{LI} et le courant de seuil du laser I_s . Ici aussi on retrouve asymptotiquement les lois de Schawlow-Townes ce qui conforte ce modèle continu.

Deux lasers à semiconducteurs ont été mesurés avec des valeurs de α connus. Le choix a été fait sur une valeur faible, $\alpha \approx 2$ laser L1, et une valeur forte, $\alpha \approx 6$ laser L2

Les résultats sont représentés la fois pour la puissance et pour la largeur spectrale de mode en fonction du courant d'injection. On observe de façon remarquable l'influence du facteur α sur la forme de la courbe de la largeur spectrale. A partir du modèle, au delà de $\alpha = 3$, comme montré sur la figure 5, on trouve une structure composée par un minimum suivi d'un maximum au seuil, on trouve ce même type de comportement pour le laser L2 sur la figure 6.

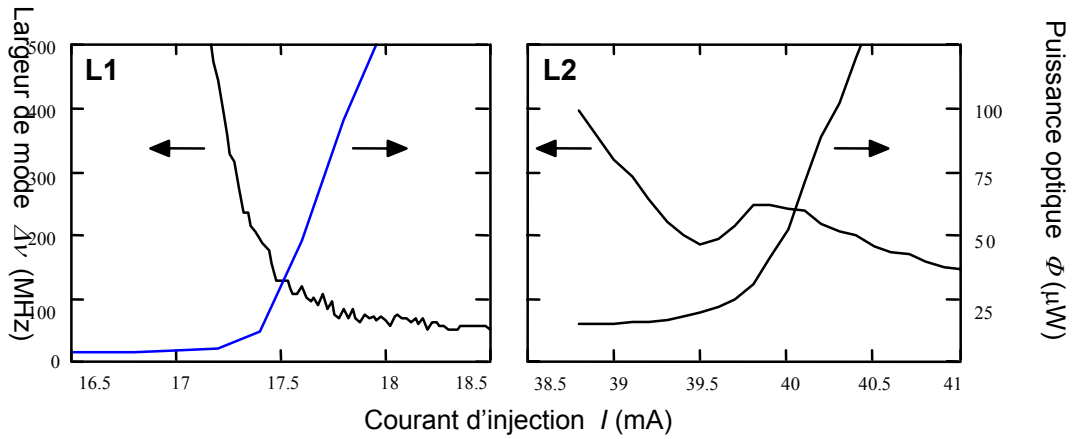


Fig. 6 Mesures de la puissance optique et de la largeur de mode au passage au seuil pour deux lasers à semiconducteurs DFB : L1 avec $\alpha = 2$ et L2 avec $\alpha = 6$.

| paramètre | symbole | valeur ajustée |
|---------------------------|------------|------------------------------------|
| temps de vie des photons | τ_p | $1,5 \cdot 10^{-12}$ s. |
| temps de vie des porteurs | τ_n | $2 \cdot 10^{-9}$ s |
| taux de gain différentiel | G_N | 6500 s^{-1} |
| taux d'émission spontanée | R_{sp} | $1,2 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$ |
| coeff. phase-amplitude | α_H | 1,7 |
| courant de seuil | I_s | 17,5 mA |

Tab. 1. Paramètres ajustés à partir du modèle de Fokker-Planck pour le laser L1.

A partir des courbes puissance optique fonction du courant $\Phi(I)$ et largeur spectrale fonction du courant $\Delta\nu(I)$ nous obtenons les quatre paramètres : τ_p , τ_n , G_N et R_{sp} . Ces quatre paramètres et la valeur du courant de seuil permettent une caractérisation complète du modèle du laser à semiconducteur. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans un article de revue dans *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* paru en 1997 [R12].

La transition de la largeur spectrale de mode d'un laser à semiconducteur au seuil montre des caractéristiques spécifiques qui dépendent fortement du paramètre α . Les mesures au seuil permettent d'extraire des paramètres internes. Les équations de continuité standard ne rendent pas bien compte du phénomène de transition puisque l'on ne considère pas les bruits présents dans la zone d'amplification. Les modèles fluctuatifs comme ceux de Fokker-Planck rendent mieux compte du phénomène.

Le passage au seuil d'un laser à semiconducteur est très intéressant du point de vue physique. Un laser dans son régime d'oscillation peut être considéré comme un état quantique macroscopique dans le sens où un grand nombre de particules, les photons, occupent le même état quantique qui est cohérent c'est le phénomène d'émission stimulée [B10], [B11]. Ces états intéressent fortement la communauté scientifique, notamment depuis la découverte des condensats de Bose-Einstein et des lasers atomiques. Le passage au seuil d'un laser permet de caractériser la transition vers la cohérence, c'est-à-dire la manière de passer d'un système de particules indépendantes décorréliées à un système des particules corrélées dans le même état quantique. Mais beaucoup plus d'études seront nécessaires pour exploiter pleinement ce phénomène. Des modèles plus détaillés pourraient inclure des bruits non gaussiens et colorés.

D'un autre côté les études sur la complexité et sur le chaos peuvent aussi tirer profit de ces études, j'y reviendrais en parlant des perspectives notamment en corrélation avec les recherches en cours sur le chaos dans le cadre du PPF (Projet Pluri Formation).

5.2 Distorsions, intermodulations et chirp dans les lasers monomodes DFB

[CI10], [CI12]

Les lasers à semiconducteur monomode à rétroaction distribuée de type DFB sont largement utilisés dans les télécommunications optiques. En analysant les limitations ce laser peut être considéré comme une source non linéaire induisant des distorsions dans une chaîne de transmission optique, il constitue également un système générateur de bruit.

Les systèmes vidéo multicanaux en modulation d'amplitude et de fréquence, CATV, *Common Antenna TeleVision*, développés à partir des années 1990, demandent un rapport signal sur bruit supérieur à 50 dB et nécessitent donc des sources laser à semiconducteur à très faible bruit et grande linéarité. Le problème des distorsions harmoniques est, pour ce type de transmissions qui utilisent la technique du multiplexage fréquentiel à sous-porteuses, au moins aussi critique que celui du bruit. Les quantités telles que le terme composite du second ordre CSO, *Composite Second Order*, et le terme composite du troisième ordre CTB, *Composite Triple Beat*, sont couramment employés dans ces systèmes afin de donner une mesure du niveau par rapport à la porteuse des produits d'intermodulation d'ordre deux et trois. Le CSO et le CTB doivent être en général inférieurs à - 60 dBc. Aussi l'intensité relative de bruit RIN, *Relative Intensity Noise*, ne doit pas dépasser - 150 dB/Hz .

Dans notre laboratoire on s'est intéressé depuis 1990 à la caractérisation spectrale des lasers à semiconducteurs monomodes de type DFB, dédiés aux systèmes CATV et ceci lors des marchés d'étude avec le CNET Lannion. On s'est intéressé aux phénomènes de rétroaction optique, aux distorsions et au chirp.

Des modèles théoriques sont nécessaires afin de prévoir les performances de ces systèmes utilisant des lasers à semiconducteurs DFB. La source principale de non linéarité dans le régime de fonctionnement, ici on est bien au dessus du seuil d'oscillation, est la compression de gain qui se traduit par une diminution du gain avec l'augmentation de la puissance émise. Son origine principale est un phénomène bien connu dans les lasers il s'agit du *Hole Burning*, qui correspond à une diminution de l'inversion de population en coïncidence avec un mode optique intense. Dans un laser à semiconducteurs on prend en compte ce phénomène à travers le facteur de compression de gain ε . La forme la plus utilisée dans la littérature pour la compression de gain est $(1 - \varepsilon S)$, voir équation (4), on rencontre aussi la forme $(1 + \varepsilon S)^{-1}$, où S est la densité de photons dans le mode optique.

La littérature scientifique dans le domaine a beaucoup investigué sur la forme la plus appropriée, [B12]. Physiquement d'après la théorie classique du laser, modélisé par les équations de Maxwell-Bloch, c'est la deuxième forme qui devrait être privilégiée [O chap IV]. Mais compte tenu de la faible valeur de ε le terme εS est en général très inférieur à 1, par conséquent l'une ou l'autre forme est utilisable. Les formes précédentes sont justifiées si l'on ne tient pas compte des inhomogénéités spatiales de type *Spatial Hole Burning* (SHB).

5.2.1 Analyses des fonctions de réponse d'un laser monomode par les séries de Volterra : Thèse de Lotfi Hassine

[TH3]

J'ai proposé à un étudiant de Supélec, Lotfi Hassine, un sujet de thèse sur la modélisation non linéaire des lasers à semiconducteur afin d'en caractériser les réponses en modulation, les distorsions, les produits d'intermodulation, le chirp et les propriétés liées aux bruits. J'ai pris en charge l'encadrement de cette thèse.

Une méthode basée sur les séries de Volterra a été utilisée, permettant d'inclure les non-linéarités dans l'étude du comportement dynamique d'un laser à semiconducteur monomode. Les résultats ont été

développés sous une forme analytique permettant de discerner les rôles des différents paramètres du système et en particulier l'influence des constantes physiques.

La méthode fut inventée par Vito Volterra en 1887 et c'est seulement 60 ans plus tard en 1942 au début de l'ère des calculateurs électroniques que Wiener l'utilisa pour trouver la réponse d'un circuit non linéaire au bruit [B13]. Les séries de Volterra constituent une représentation fonctionnelle des systèmes non linéaires à mémoire généralisant l'intégrale de convolution des systèmes linéaires. Pour une entrée $x(t)$ la sortie correspondante $y(t)$ sera exprimée par:

$$y(t) = H_1[x(t)] + H_2[x(t)] + H_3[x(t)] + \dots + H_n[x(t)] + \dots \quad (23)$$

$$\text{avec } H_n[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i$$

où $h_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ est appelé noyau de Volterra d'ordre n .

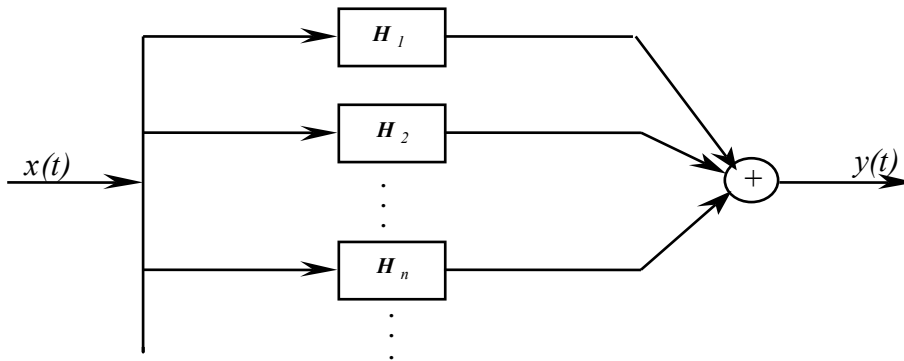


Fig. 7 Représentation schématique d'un système non linéaire caractérisé par les séries de Volterra.

5.2.1.1 Méthode de Volterra : réponse d'un laser à semiconducteur à une modulation. [TH3], [R7], [CI9].

À partir des équations d'évolution incluant la non-linéarité du gain, on calcule les séries génératrices non commutatives permettant d'obtenir la réponse à une entrée analytique arbitraire, développable en série entière. Deux types de réponse ont été étudiés : la réponse à un signal sinusoïdal et la réponse indicelle. Dans le premier cas, la réponse au premier ordre, la distorsion harmonique du second ordre, la déviation dynamique de la fréquence, chirp, ont été étudiées analytiquement en fonction de la fréquence de modulation, du courant de polarisation et du facteur de compression du gain ε .

Les résultats ont été validés par des résultats expérimentaux effectués au laboratoire ou dérivés de la littérature. Ils ont été mis en perspective avec ceux obtenus par les méthodes communément utilisées dans le domaine : l'analyse en petits signaux ou la méthode par perturbation plus classique, introduite par K.Y. Lau et A. Yariv [B14]; cette dernière qui est applicable seulement dans le cas d'une entrée harmonique, utilise toujours des approximations.

Dans un laser à semiconducteur la réponse du premier ordre à une modulation présente une fréquence de résonance. La présence d'un pic de résonance très prononcé, provoqué par l'importante différence entre les valeurs du temps de vie des photons τ_p et du temps de vie des porteurs τ_n , se manifeste à travers les fortes oscillations de relaxation observables dans la réponse indicelle. La fréquence de résonance f_R dépend du gain différentiel a_d , du temps de vie τ_p et de la densité statique des photons

S_0 cette dernière dépend des conditions de polarisation. Le coefficient d'amortissement de la résonance, ξ dépend aussi d'une manière importante du facteur de compression de gain ε . Pour la deuxième harmonique chaque porteuse fournie en entrée va produire en sortie un signal parasite de fréquence double et d'amplitude bien inférieure.

Les résultats de la modélisation par les séries génératrices de Volterra montrent aussi l'existence d'une composante continue due à la modulation, ce résultat sera exploité par la suite expérimentalement. La distorsion harmonique du second ordre 2HD a été confrontée avec précision aux résultats antérieurs : la présence de deux pics très amortis, voir fig. 8, à la fréquence de résonance et à sa moitié a été justifiée.

Dans le cas de la réponse indicielle, les réponses du premier et du second ordre sous leur forme analytique complète ont été calculées. Des expressions du temps d'établissement et du dépassement ont été proposées; leur dépendance en fonction de la fréquence de relaxation et du taux d'amortissement sont mises en évidence, à notre connaissance, pour la première fois.

Ce travail sur l'étude de la modulation d'un laser à semiconducteur a fait l'objet d'une publication d'un article de revue dans *IEEE Journal of Quantum Electronics* [R7]

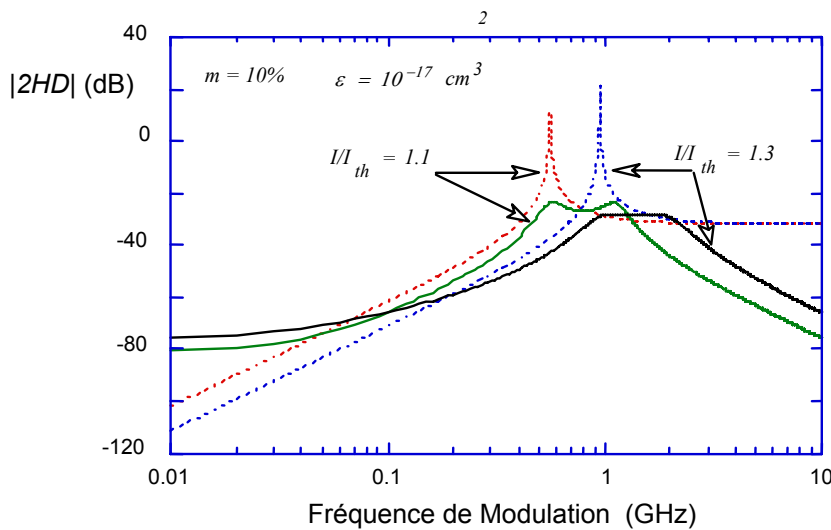


Fig. 8 Distorsion du second ordre en fonction de la fréquence de modulation obtenue par la méthode de Volterra (trait plein) comparée à la méthode des perturbations (trait en pointillé) utilisée pour la résolution des équations de continuité dans le cas du fonctionnement monomode d'un laser à semiconducteurs en incluant le facteur de compression de gain ε .

5.2.1.2 Méthode de Volterra: bruits d'un laser à semiconducteur. [TH3], [R8].

Les bruits dans les lasers à semiconducteur limitent sévèrement les performances des systèmes de communication optiques. Une bonne compréhension des différentes sources de bruit et une évaluation théorique des différentes grandeurs relatives aux bruits s'avèrent nécessaires.

Les différentes caractéristiques des bruits dans les lasers à semiconducteur ont été calculées analytiquement dans le domaine temporel et fréquentiel, en utilisant le modèle des séries de Volterra en résolvant les équations d'évolution stochastiques, qui incluent les sources de bruits de Langevin. Cette nouvelle approche dans l'analyse des bruits permet, en premier lieu, d'évaluer analytiquement, les fonctions de covariances et d'inter-covariances des variables du laser à savoir : la population des photons, la population des porteurs et la phase du champ électrique dans la cavité. Ces fonctions constituent un outil puissant permettant le calcul du *RIN*, *Relative Intensity Noise*, du spectre du bruit de fréquence, de la cohérence entre bruit de fréquence (FM) et bruit d'amplitude (AM), du bruit de phase et du spectre du laser. Le couplage entre bruit de phase et bruit d'amplitude responsable de la

dissymétrie du spectre du laser est analysé en fonction du courant de polarisation et du coefficient de compression de gain ε , et du paramètre α .

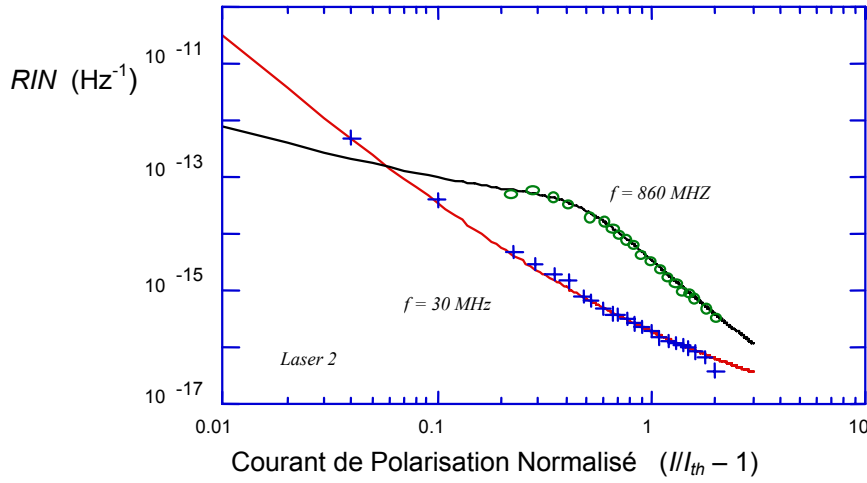


Fig. 9 Spectre du RIN d'un en fonction du courant d'injection à deux fréquences de modulation obtenu par la méthode de Volterra (trait plein) comparaison avec l'expérience (croix et cercles) sur un laser à semi-conducteur.

Ce travail sur l'étude des bruits d'un laser à semiconducteur ont fait l'objet d'un article de revue dans *IEEE Journal of Quantum Electronics* [R8].

5.2.2 Nouvelle méthode d'extraction du paramètre de compression de gain ε [R10], [CN9].

A partir de certains développements de la thèse de Lotfi Hassine, j'ai voulu vérifier d'une façon plus systématique certains calculs théoriques et notamment la présence d'une contribution à la composante continue de la puissance optique en présence de modulation. En faisant une analogie avec les amplificateurs électroniques non linéaires on retrouve le même type de comportement, en effet, par exemple, une non linéarité quadratique induit une distorsion du deuxième ordre mais aussi conjointement une contribution à la composante continue, changeant le point de polarisation du circuit. Comme cette composante continue a comme origine le terme non linéaire du gain d'un laser à semiconducteurs il devait donc être fonction du facteur de compression de gain ε .

Les développements par séries de Volterra effectués représentent une résolution très rigoureuse, mais les expressions très complexes masquent souvent une dépendance simple avec des paramètres internes du laser. J'ai repris les équations de continuité et effectué une dérivation de cet effet en identifiant les termes du deuxième ordre, j'ai trouvé une expression simple en fonction du carré de l'amplitude du courant d'injection modulant et en fonction du carré du facteur de compression de gain ε . Ce résultat m'a permis de trouver une nouvelle méthode de mesure de ε .

On utilise les équations de continuité en fonctionnement monomode pour le nombre de photons P et pour le nombre de porteurs N dans la cavité en incluant facteur de compression de gain normalisée ε_n bien au dessus du seuil, en négligeant les termes d'émission spontanée, on a :

$$\frac{dP}{dt} = G_N (N - N_0)(1 - \varepsilon_n P) P - \frac{P}{\tau_p} \quad (24a) \quad ; \quad \frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - G_N (N - N_0)(1 - \varepsilon_n P) P - \frac{N}{\tau_n} \quad (24b)$$

En régime permanent, au dessus du seuil, la condition d'oscillation laser est donnée par l'égalisation du gain avec les pertes ce qui correspond au verrouillage du gain :

$$G_N (N - N_0) (1 - \varepsilon_n P) = \frac{1}{\tau_p} \quad (25)$$

Cette relation lie d'une façon non linéaire les variations du nombre de porteurs N avec la variations du nombre de photons P . Par une analyse en petits signaux, une petite augmentation du courant d'injection i par rapport au courant statique I_0 , entraîne une augmentation correspondante du nombre de photons p . En éliminant la dépendance avec le nombre de porteurs dans les équations (24a) et (24b), on trouve une relation entre les variations de courant et les variations du nombre de photons. On développe cette relation jusqu'au deuxième ordre :

$$\frac{p}{\tau_p} = \frac{i}{e} - \frac{2\tau_p \varepsilon_n^2}{\tau_n G_N e^2} i^2 \quad (26)$$

Pour une modulation sinusoïdale du courant d'injection, d'amplitude i_0 , on obtient pour le nombre de photons une réponse du premier ordre p_1 , une réponse du deuxième ordre p_2 , et une composante continue additive p_{dc} :

$$p_1 = \frac{\tau_p}{e} i_0 \quad ; \quad p_{dc} = p_2 = \frac{-\tau_p^2 \varepsilon_n^2}{\tau_n G_N e^2} i_0^2 \quad (27)$$

La réponse de la puissance optique ϕ au premier et au deuxième ordre en sortie du laser s'exprime en fonction des paramètres du laser, que sont la pente η_{LI} , le courant de seuil I_s , le facteur d'émission spontanée n_{sp} , la longueur d'onde λ , l'indice du matériau n_{sc} et les constantes fondamentales e , charge de l'électron, c , vitesse de la lumière et h constante de Planck.

$$\phi_1 = \eta_{LI} i_0 \quad ; \quad \phi_2 = \phi_{dc} = - \left[\eta_{LI} \frac{I_s}{n_{sp}} \left(\frac{2\eta_{LI} n_{sc} \lambda}{\alpha_m h c^2} \right)^2 \right] \varepsilon_n^2 i_0^2 \quad \text{et} \quad \varepsilon = \varepsilon_n \frac{vol}{\Gamma} \quad (28)$$

Les mesures ont été effectuées sur des lasers DFB à puits quantiques contraints qui ont effectivement montré que la composante continue diminue en fonction de l'amplitude du courant de modulation.

Cette méthode comparée aux autres méthodes expérimentales de détermination du facteur ε qui sont comme par exemple par la caractérisation du pic de résonance de la courbe de réponse du laser ou par la détermination de la variation statique de la longueur d'onde, offre l'avantage d'être plus directe, mais nécessite néanmoins un photomètre très sensible. Ce travail a fait l'objet d'un article dans *Electronics Letters* [R10].

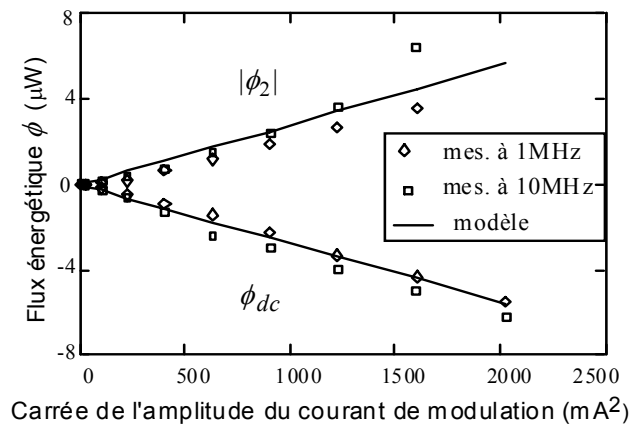


Fig. 10 Mesures et modèle de la distorsion du deuxième ordre et de la modification de la composante continue de la puissance optique en fonction du carré de l'amplitude du courant de modulation d'un laser à semiconducteurs DFB.

5.2.3 Intermodulations CSO et CTB et inclusion des effets d'inhomogénéité de cavité LSHB des lasers DFB

J'ai proposée à Raffaella Vinzio, en stage à Supélec, dans le cadre d'un Master du « Politecnico » Turin (*Tesi di Laurea*) et en double diplôme Erasmus, un travail de recherche sur la modélisation analytique du CSO, du CTB et du chirp dans la cas d'un laser monomode DFB. L'analyse a été effectuée en appliquant la méthode des perturbations aux équations de continuité non linéaires, dans le cas de l'injection d'une ou plusieurs fréquences. Les simulations ont été effectuées en faisant varier le courant de polarisation, la fréquence de modulation et aussi la température du dissipateur thermique collé à la puce du laser.

5.2.3.1 Intermodulations CSO et CTB. [R13].

Dans le cadre des transmissions optiques analogiques, les effets non linéaires liés à la modulation directe d'un laser à semiconducteurs sont extrêmement gênants au niveau du récepteur qui ne tolère que des niveaux très faibles de distorsion et d'intermodulation. Le multiplex de signaux émis peut regrouper jusqu'à 80 canaux modulés par porteuses séparées les unes des autres par un pas constant, d'un ou deux ordres de grandeur plus petit que la fréquence de la porteuse. Pour des émissions de type CATV, qui concernent les bandes UHF (30 - 300 MHz) et VHF (300 - 3000 MHz) jusqu'à 900 MHz, une valeur typique du pas est 8 MHz et pour les transmissions des signaux issus des mobiles GSM ou DCS, couvrant la bande des quelques gigahertz, la valeur du pas peut être de 100 MHz. Les canaux réels recouvrent une portion de bande non nulle, néanmoins, on peut raisonner en termes d'entrées purement sinusoïdales, en effet les tests, proches des conditions d'utilisation réelles, sont effectués à l'aide de générateurs multi-porteuses. Les bandes des canaux CATV, i.e. mires SECAM et PAL en Europe, et NTSC aux Etats-Unis, couvrent plus d'une octave : elles sont donc perturbées en même temps par les ensembles des produits d'intermodulation d'ordre deux, CSO, et trois, CTB, dont les définitions, relatives au $m^{\text{ième}}$ canal, où S est la densité de photons, sont les suivantes :

$$CSO_m = \frac{\sum_{i \neq j} [S_{f_i + f_j = f_{m+}} + S_{f_i - f_j = f_{m-}}]}{S_{f_p}} \quad CTB_m = \frac{\sum_{i \neq j \neq k} [S_{2f_i - f_j = f_p} + S_{f_i + f_j - f_k = f_p}]}{S_{f_p}} \quad (29)$$

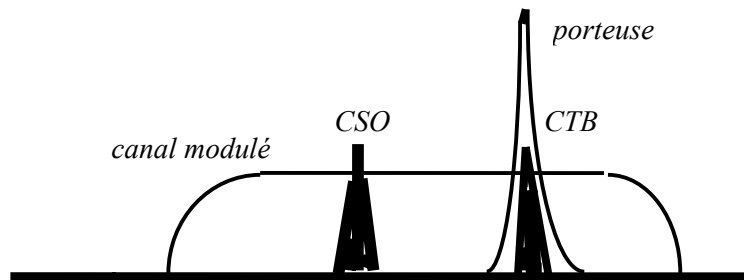


Fig. 11 Transmissions CATV-MABLR: situation d'un canal appartenant au multiplex transmis.

L'injection directe de trois porteuses sinusoïdales, séparées par un pas, d'un ou deux ordres de grandeur plus petit a été étudiée. On retrouve les pics du deuxième harmonique, comme dans le cas de la distorsion d'ordre deux, dont celui à la résonance qui est ici beaucoup plus prononcé. La dépendance du niveau du produit d'intermodulation d'ordre trois IMD_3 avec le facteur de compression de gain ε a aussi été obtenue. Le paramètre qui affecte directement la réponse à une modulation est le

nombre des photons, qui montre une étroite dépendance vis-à-vis du courant de polarisation et de la température.

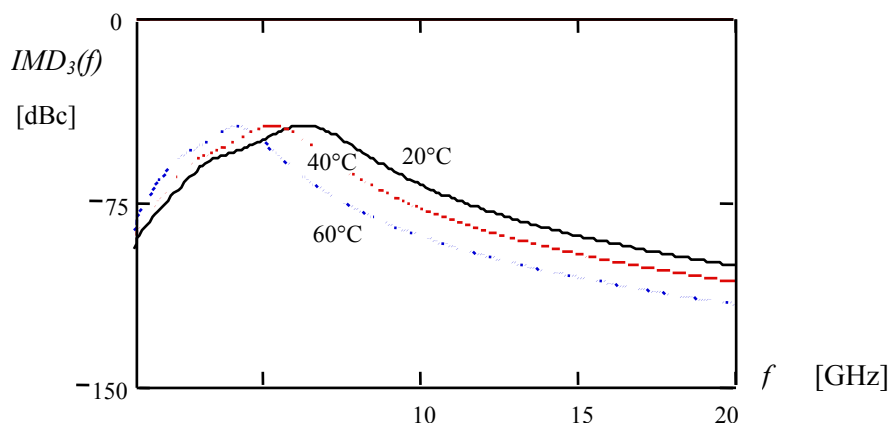


Fig. 12 Produits d'intermodulation d'ordre trois d'un laser DFB : effet de la température.

5.2.3.2 inclusion des effets d'inhomogénéité de cavité LSHB. [R13].

Les lasers à semiconducteurs monomodes de type DFB présentent par construction un réseau périodique inscrit au voisinage de la couche active. Ce réseau a comme conséquence l'apparition d'un champ axial non uniforme et des trous spatiaux apparaissent dans la densité des porteurs. Cette variation est connue sous le nom de LSHB, *Longitudinal Spatial Hole Burning*, elle affecte fortement les caractéristiques statiques et dynamiques du laser, car la distribution non uniforme des porteurs entraîne la variation spatiale du gain différentiel et de l'indice de réfraction. Ceci a comme conséquence que les modèles qui ne tiennent pas compte du LSHB ne donnent pas de bons résultats aux fréquences de modulation intermédiaires jusqu'au GHz, et notamment dans la bande UHF-VHF des systèmes CATV. Au-delà, comme on le verra, les effets de LSHB sont négligeables.

La méthode conventionnelle d'analyse de ce phénomène consiste à diviser le laser en un nombre fini de segments et à résoudre, à chaque pas d'itération, l'équation unidimensionnelle pour les porteurs et l'équation d'onde pour le champ optique. Différents modèles sont basés soit sur la méthode des matrices de transfert, soit sur la résolution numérique des équations des ondes couplées et des équations de continuité. Les modèles présentés indépendamment par Schatz [B15] et Kinoshita [B16], basés sur trois équations de continuité, permettent de restreindre la partie numérique uniquement au calcul des conditions statiques et autorisent l'application de la méthode des perturbations pour la partie dynamique. L'idée fondamentale repose sur la séparation des fluctuations longitudinales en deux contributions : uniforme et non uniforme.

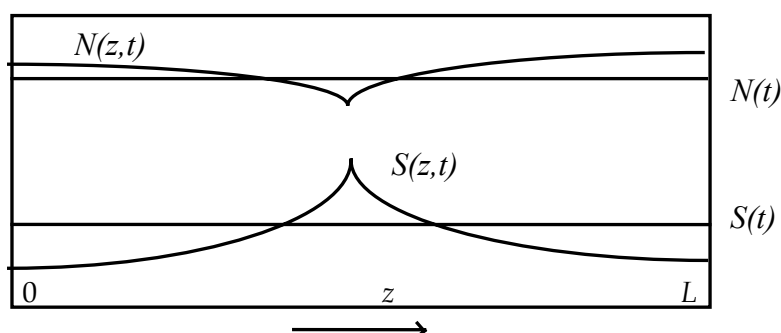


Fig. 13 Exemples de profils spatiaux inhomogènes des densités des photons et de porteurs à l'intérieur de la cavité active d'un laser DFB.

Des nouvelles formulations pour les distorsions harmoniques et les produits d'intermodulation ont été dérivées, en comparant à chaque fois les résultats obtenus avec ceux de la littérature.

Les trois équations de continuité pour l'analyse du comportement dynamique d'un laser DFB sont dérivées à l'aide des formules qui décrivent les fluctuations longitudinales des densités de photons S et des porteurs N . La distribution de la densité des porteurs $N(z)$ suivant l'axe du laser provoque un changement dans l'indice de réfraction à travers le gain différentiel ce qui se traduit par une déviation de la condition de Bragg, qui permet de caractériser le facteur du LSHB, σ , en fonction du facteur de couplage κ du réseau de Bragg, sa détermination s'effectue de façon itérative. La composante d'intermodulation à la fréquence ω se calcule, en dB, par :

$$20 \cdot \log[IMD(\omega^*)] = 20 \cdot \log \left[\frac{S_{\omega^*}}{S_{\omega_c}} \right] \quad (30)$$

où ω_c est la fréquence de la porteuse et S_{ω} est la densité de photons à l'harmonique ω calculée par le système d'équations :

$$\begin{bmatrix} i\omega + \xi \frac{dg}{dN} S_o \left(\varepsilon A_o + \frac{\sigma B_o}{i\omega + \gamma} \right) & -\xi \frac{dg}{dN} S_o \left(1 - \frac{\sigma \frac{dg}{dN} S_o}{i\omega + \gamma} \right) \\ \frac{1}{\tau_p \xi} - \frac{dg}{dN} S_o \left(\varepsilon A_o + \frac{\sigma B_o}{i\omega + \gamma} \right) & i\omega + \gamma - \frac{\sigma \left(\frac{dg}{dN} S_o \right)^2}{i\omega + \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{\omega} \\ N_{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \delta_{1,n} \\ -\frac{1}{\xi} \end{bmatrix} W_n^{\omega} \quad (31)$$

avec les coefficients:

$$\begin{aligned} A_o &\equiv (N_o - N_t)(1 + \sigma) - 2\sigma N_{\sigma_o} \\ B_o &\equiv \frac{N_{\sigma_o}}{\tau_c S_o} - \varepsilon S_o \frac{dg}{dN} C_o \\ C_o &\equiv 2(N_o - N_t) - N_{\sigma_o} \end{aligned} \quad (32)$$

Dans l'équation (31) W_n est le terme de génération de la distorsion d'ordre n .

N_0 , N_{s0} et S_0 représentent les valeurs statiques des densités de porteurs et de photons.

L'intérêt de ce modèle est qu'il permet d'étudier le comportement dynamique des lasers d'une façon extrêmement simple, uniquement à l'aide des trois équations de continuité et du tableau de valeurs pour σ . Les effets de l'introduction du facteur de LSHB sont visibles dans la bande qui est réservée aux transmissions CATV: le niveau de distorsion d'intermodulation augmente sensiblement selon l'importance de la non-uniformité qui affecte la distribution des photons à l'intérieur du laser. Je décrirais une méthode similaire dans l'étude des VCSEL.

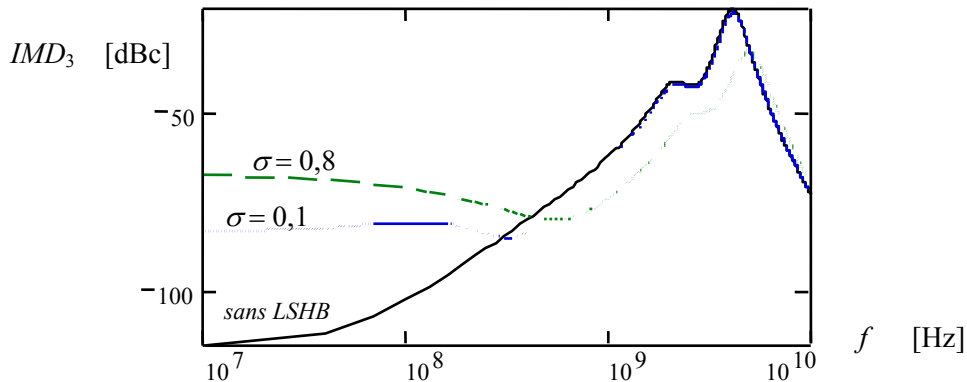


Fig. 14 Produits d'intermodulation du troisième ordre avec et sans LSHB pour un laser monomode.

5.2.4 Effets de la température sur le chirp d'un laser DFB

[R13]

La modulation directe d'un laser à semiconducteur ne produit pas une modulation d'amplitude pure AM, car, en même temps que l'amplitude, la fréquence d'émission est aussi modulée, modulation FM. Il s'agit du phénomène de *chirp* qui dépend de la modulation des porteurs et de la température de la couche active. Une des contributions importantes est bien sûr due au facteur α de Henry, son influence est négligeable pour des fréquences de modulation inférieures à environ 10 MHz. Pour évaluer la réponse FM proche des fréquences de résonance, le modèle dérivé des équations de continuité habituelles, incluant α , est plus que suffisant [R7], [R10]. Par contre aux basses et moyennes fréquences de modulation, il est extrêmement important de prendre en compte le LSHB et l'influence de la température pour l'analyse du chirp.

La densité des porteurs contrôle l'amplitude et la fréquence du mode émis. Dans les lasers à distribution de champ interne uniforme, le courant injecté modifie les populations de porteurs de façon à changer l'indice de réfraction et donc la longueur d'onde de Bragg. Dans les lasers DFB la distribution du champ n'est pas uniforme et les variations de la densité des porteurs se traduisent par des variations correspondantes de l'indice de réfraction le long de la cavité, ayant comme résultat la modification continue des conditions au seuil pour le gain $g_s L$ et pour le changement de la longueur de cavité δL , où L est la longueur effective de la cavité DFB. Les différents mécanismes sont illustrés sur la figure suivante.

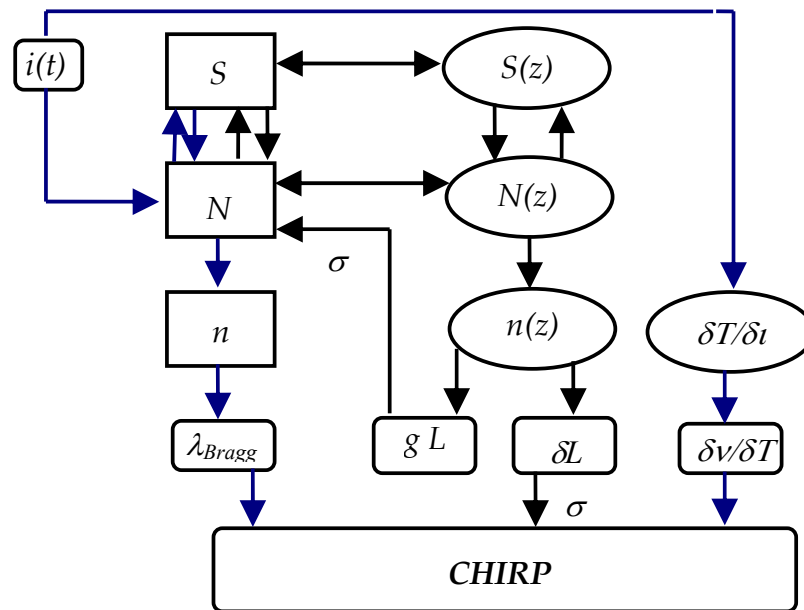


Fig. 15 Différents mécanismes contribuant au chirp dans un laser à semiconducteurs.

La structure simplifiée de laser adopté dans le modèle était celle d'une structure *ridge* à puits quantiques, où le dissipateur thermique est constitué par le substrat et le courant est injecté par une électrode à travers une étroite couche d'entrée. Le courant injecté traverse cette couche pour arriver à la couche active qui comprend l'ensemble des puits. L'échauffement des couches produit par le passage du courant est dû à la puissance non-radiative dissipée par effet Joule à l'intérieur du dispositif et, au niveau de la région active, par la puissance électrique dissipée à la jonction et par les mécanismes de type Auger.

On a considéré toutes ces contributions pour la détermination de la fonction génératrice de la chaleur utilisée dans l'équation de conduction de la chaleur :

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T + W_{th} \quad \text{avec} \quad W_{th}(I) = \underbrace{r_e I^2}_{\text{couche d'entrée}} + \underbrace{r_a (I - I_f)^2 + vol_a R_{nr} E_g + V_j (I - I_f)}_{\text{couche active}} \quad (33)$$

où C_{th} est la capacité thermique, k la diffusivité thermique. W_{th} est la fonction génératrice de chaleur incluant les termes : r_e la résistance d'entrée, r_a la résistance de la couche active, I_f le courant de fuite, vol_a la volume de la zone active, R_{nr} le taux de recombinaison non radiatif, E_g la tension de gap et V_j la tension de jonction. La résistance thermique totale est calculée par la mise en série des résistances thermiques de la couche d'entrée, de la couche active et des couches du substrat et du dissipateur thermique. A cause des fortes valeurs des densités de courant traversant la couche active il existe une augmentation de température non négligeable à l'intérieur de cette couche.

La modulation, si elle est effectuée à une fréquence suffisamment faible, provoque une variation de l'énergie thermique emmagasinée dans la couche active de la diode. Le paramètre caractéristique dans le chirp est la fréquence de coupure thermique, f_{th} , fixée par l'épaisseur des puits quantiques de la couche active et par les caractéristiques de transport du matériau (InGaAsP dans notre cas). La valeur de cette fréquence est de l'ordre de quelques dizaines de MHz, donc par rapport au cas d'un laser massif, l'intervalle d'influence de l'effet thermique est plus grand puisqu'il a lieu à des fréquences supérieures.

$$\left. \frac{\delta \nu}{\delta i} \right|_{th} = \frac{\delta \nu}{\delta T} \cdot \frac{K_{th}}{\left(1 + \frac{if}{f_{th}} \right)} \quad (34)$$

Le LSHB a aussi une contribution sur le *chirp* aux basses fréquences et s'ajoute à celle, causée par l'effet thermique. Un autre effet secondaire, quand le LSHB est important, est le décalage vers des plus hautes fréquences, comme déjà remarqué dans le cas de la distorsion harmonique et de l'intermodulation, l'expression du chirp est donnée par :

$$\frac{\delta \nu}{\delta i}(i\omega) = \frac{\alpha \xi \frac{dg}{dN}}{4\pi} \frac{\left[\left(i\omega + \frac{1}{\tau_e} \right) N_\omega - B_o S_\omega \right]}{i\omega + \gamma} \quad (35)$$

Ce travail a fait l'objet de la publication d'un article dans la revue *IEEE Journal of Quantum Electronics* en 1998. [R13].

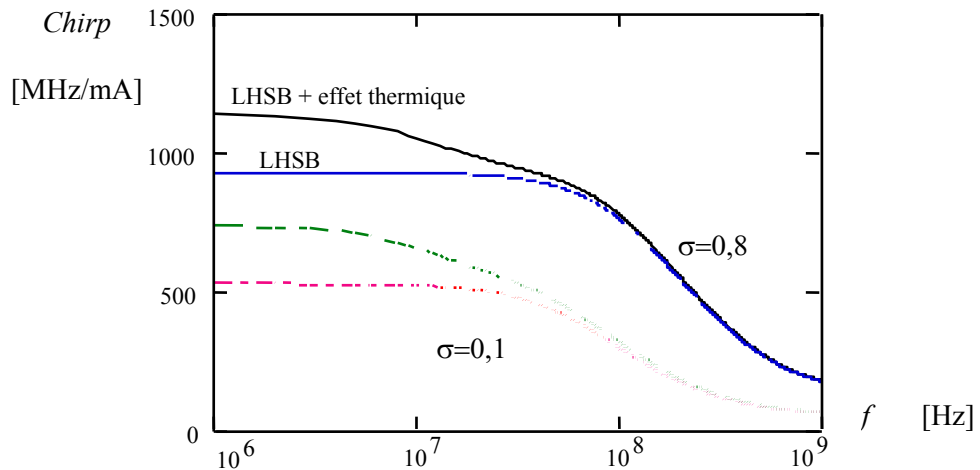


Fig. 16 Effet thermique sur le chirp en fonction des différentes valeurs du paramètre σ de LSHB.

5.3 Lasers à structure complexe, DBR et en barrette, influence des effets thermiques

5.3.1 Modélisation des lasers DBR multisections

La thèse de Shirin Bozorgui, que j'ai co-encadré, portait sur l'étude du comportement de lasers à réflecteur de Bragg DBR, *Distributed Bragg Reflector*, à trois sections. Ces structures peuvent constituer des solutions pour réaliser des sources accordables dans les réseaux multicolores à multiplexage en longueur d'onde dense, DWDM (*Dense Wavelengthh Divison Multiplexing*). L'enjeu technologique consiste à réaliser une grande plage d'accordabilité en longueur d'onde, typiquement de quelques nm de large, avec des largeurs spectrales statiques et en modulation (chirp) les plus faibles possibles. L'accord en longueur d'onde est contrôlé à l'aide d'électrodes sur les zones passives du laser : la zone de Bragg et la zone de phase. Actuellement on envisage d'utiliser ce genre de composant, comme source de secours pour un canal défectueux d'un multiplex DWDM parmi les N canaux, généralement au nombre de 40 ou 80.

5.3.1.1 Effets thermiques dans des laser à semiconducteurs DBR multisections. [TH4], [CI14].

De manière à inclure les effets thermiques dans l'analyse d'un laser DBR multiélectrode un modèle a été développé inspiré des travaux de Joyce et Dixon [B17] pour les lasers à double hétérojonction. Ce modèle suppose plusieurs simplifications relatives à la structure du laser et aux phénomènes physiques qui s'y déroulent. Le laser se présente sous la forme d'un parallélépipède rectangle avec plusieurs couches de conductivité thermique κ_i et d'épaisseur h_i . La chaleur est engendrée de façon uniforme et stationnaire sur une surface de largeur A (inférieure à la largeur B de la puce) sur toute la longueur de la zone active L . La majeure partie de la chaleur est générée uniformément dans la zone active par le phénomène de recombinaison non radiative. Quant à l'effet Joule il se produit essentiellement au voisinage de la zone active dans les zones de confinement optique adjacentes à la couche active. On peut négliger les fuites de chaleur par convection sur les facettes latérales en contact avec l'air, de même les fuites thermiques par radiation et rayonnement.

La symétrie rectangulaire du laser à semiconducteurs et l'absence de flux de chaleur traversant les surfaces de contact avec l'air implique que la propagation de la chaleur est quasi-bidimensionnelle dans le plan (xOy). Le laser est monté sur un puits de chaleur à température fixe, $T_{thermost}$, régulée par un dispositif thermoélectrique. Comme montré sur la figure 17, un flux thermique est considéré depuis la source thermique vers le puits.

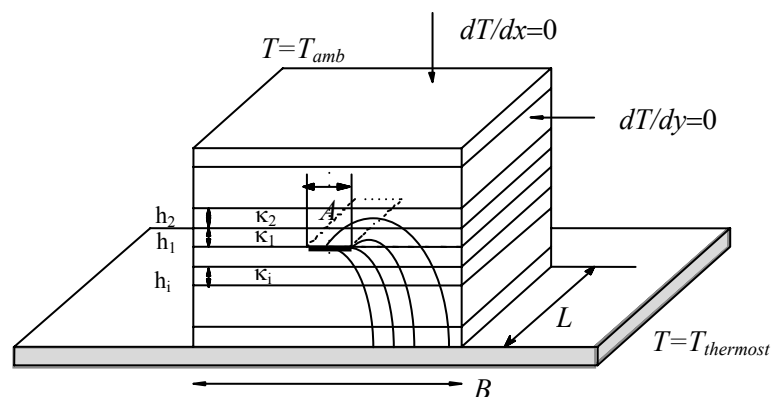


Fig. 17 Schéma du modèle thermique en couches thermiques pour un laser à semiconducteur.

La distribution de la température statique a été calculée analytiquement dans chaque section j du laser DBR : zone active, zone de phase et zone de Bragg.

L'analyse est basée sur la résolution de l'équation de conduction de chaleur (voir équation (33)).

Les deux principales fonctions génératrices de chaleur, considérées dans ce modèle, sont :

- 1) la fonction génératrice de chaleur de la couche active, W_{act} , analogue à celle considérée en (33) et qui peut être considérée comme la différence entre la puissance électrique d'entrée et la puissance totale optique produite.
- 2) la fonction génératrice due à l'effet Joule W_{joule} par la résistance ohmique de la puce qui a lieu essentiellement dans les couches de confinement.

$$W_{act} = V_D [J_{act} - \eta_L (J_{act} - J_{th}) - \eta_{sp} J_{th} - W_{sp}] \quad W_{Joule} = J^2 r \quad (36)$$

V_D représente la tension de la jonction électrique, J_{act} la densité du courant injecté dans la section active et J_{th} la densité de courant de seuil. Le rendement interne et externe au-dessus et au-dessous du seuil sont respectivement η_L et η_{sp} . La puissance d'émission spontanée, absorbée essentiellement par le substrat, est représentée par le terme W_{sp} . Dans la zone active, du fait des puissances mises en jeu, il faut considérer la contribution des deux sources de chaleur W_{act} et W_{sp} dans (36). Dans les zones passives de Bragg et de phase seule la contribution due à l'effet Joule est significative.

Après séparation des variables et résolution par la méthode de Laplace, on obtient une solution analytique pour l'accroissement de température ΔT_i dans la $i^{ème}$ couche :

$$\Delta T_i^j(x, y) = \beta_{i,0}^j (1 - r_{i,0}^j x) + \sum_{n=1}^{\infty} \beta_{i,n}^j [\cosh(K_n x) - r_{i,n}^j \sinh(K_n x)] \cos(K_n y) \quad (37)$$

avec $K_n = 2n\pi/B$ où B est la largeur de la puce. Pour chaque section, les différents coefficients β_i^j et r_i^j sont déterminés à partir des conditions aux limites dans la section considérée, ils dépendent des conductivités thermiques des couches et de leur épaisseur.

Afin d'inclure dans le modèle le rayonnement thermique de la couche supérieure de la puce laser vers l'extérieur, à la température ambiante, la condition aux limites suivante a été considérée :

$$\left. \frac{\partial T_{i \sup}^j(x, y)}{\partial x} \right|_{x=h_{i \sup}} = -\mu \left(T_{i \sup}^j(x, y) \Big|_{x=h_{i \sup}} - T_{amb} \right) \quad (38)$$

où μ représente le coefficient de transfert de la chaleur.

Cette approche sera aussi utilisée pour les travaux successifs sur les lasers à semiconducteurs DFB en barrette et pour les réseaux de lasers VCSEL.

5.3.1.2 Analyse de réseaux de Bragg avec une modulation non uniforme. [TH4], [CI11], [CI15]

Une autre partie de ce travail de thèse a consisté à modéliser un laser DBR à pas variable afin de voir si ceci pouvait améliorer l'accordabilité (variation de longueur d'onde). On s'était inspiré d'un travail sur un laser DFB à pas variable proposé par Hartmut Hillmer en 1993 [B18]. L'implémentation du réseau à pas variable dans un laser DFB, nommé *chirped DFB grating*, semblait très intéressante pour améliorer certaines caractéristiques, parmi lesquelles l'accordabilité, la diminution de la largeur spectrale et l'obtention d'une intensité plus uniforme à cause de la diminution de l'effet du LSHB. Chacune de ces applications nécessite une variation longitudinale spécifique du pas de réseau.

Ici l'idée pour créer un pas variable était d'utiliser un réseau standard à contre-réaction distribuée en ajoutant une courbure à la surface, le pas effectif du réseau devient donc fonction de l'angle de courbure. La fonction modulation du pas du réseau de Bragg est exprimée par la fonction de courbure en fonction de l'abscisse x , sur une longueur L_{DBR} . Pour les faibles pentes la fonction de courbure peut être approximée par la fonction de modulation $\Lambda(x)$ fonction du paramètre W qui correspond à la différence de hauteur due à la courbure :

$$\Lambda(x) = \Lambda_x \sqrt{1 + \frac{W^2}{L_{DBR}^2} \left(\cos\left(\frac{\pi x}{L_{DBR}}\right) - 1 \right)} \quad (39)$$

Afin de limiter les pertes dues a la courbure il faut choisir un angle de courbure faible.

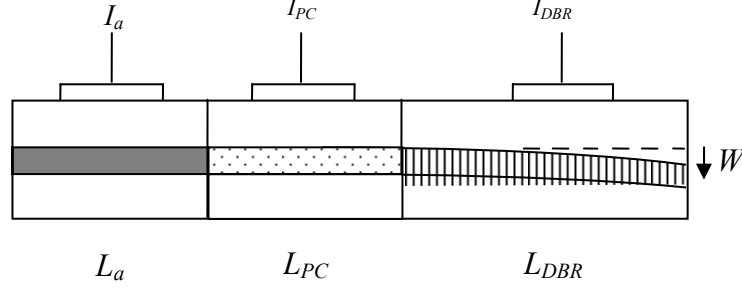


Fig 18 Laser DBR à trois sections avec un réseau de Bragg à pas variable.

Pour les simulations il faut considérer les variations spatiales du pas de réseau introduites par la courbure de guide d'onde. Pour ce faire, la section DBR est divisée en sections, dans lesquelles le pas du réseau peut être considéré constant et varie d'une section à l'autre selon la fonction de modulation du réseau $\Lambda(x)$. Cette quantification permet de calculer la réflectivité effective du réseau. Tous les paramètres notamment les coefficients de couplage et l'absorption du matériau sont considérés constants à l'intérieur de chaque section. Il est nécessaire de considérer un nombre de sections assez élevé, de manière à augmenter la précision.

L'analyse consistait à trouver une fonction de courbure optimale correspondant à une augmentation de l'accordabilité continue (sans sauts de mode). Pour déterminer la variation de la longueur d'onde la réflectivité effective et le gain au seuil ont été calculés en fonction de la longueur d'onde à l'aide de la théorie des ondes couplées. Les résultats de simulation sont montrés sur la figure 19. On constate une relative augmentation de l'accordabilité continue. Le réseau à pas variable entraîne aussi une forte asymétrie de la réflectivité effective. De plus, la longueur d'onde du mode principal est décalée vers les longueur d'ondes plus grandes, du fait de l'augmentation du pas de réseau, ce qui signifie que l'implémentation d'un réseau à pas variable permet aussi un contrôle de la longueur d'onde du mode principal.

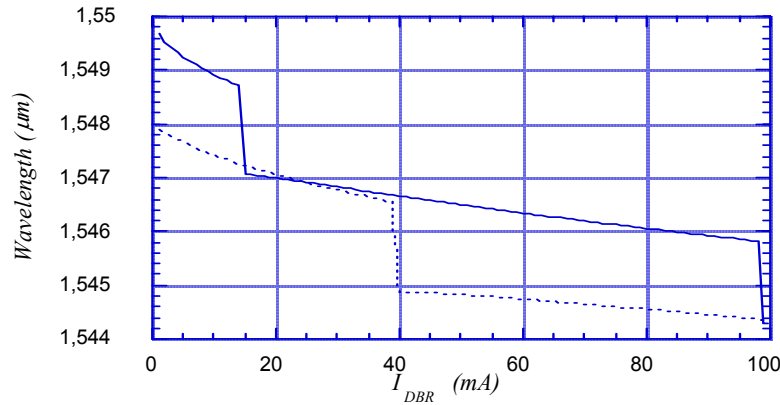


Fig. 19 Accordabilité pour un laser DBR à pas variable (trait plein) et un laser DBR classique (pointillé). Paramètres utilisés: $L_a=150 \mu m$, $L_{DBR}=200 \mu m$, $W=10.81 \mu m$, $kL_{DBR}=2$

5.3.1.3 Modélisation et caractérisation de diodes laser DBR à deux sections accordables en longueur d'onde DWDM. [TH5], [R15], [CI21], [CI22], [CN17], [CN18], [CN21], [CN23], [CN24], [CN26]

J'ai participé à l'encadrement de la thèse de Juan Manuel Campos, portant sur l'optimisation des laser à semiconducteurs accordables DBR à deux sections destinés à être utilisés dans les réseaux multiplexés en longueur d'onde DWDM. Les recherches ont porté en particulier sur la modélisation de la variation de la largeur de mode de ce type de laser en fonction du courant dans la zone de Bragg, cette variation étant expérimentalement caractérisée en laboratoire. Les variations du facteur d'élargissement de mode α_H , facteur de Henry, et du nombre de porteurs dans la zone active en sont responsables. La notion de largeur de mode des lasers à semi-conducteur DBR à deux sections n'est pas toujours simple dans la mesure où ce type de structure présente plusieurs sauts de mode, et sa largeur de mode est variable en fonction de l'accord. Par exemple la largeur de mode devient très grande près d'un saut de mode.

L'utilisation d'un modèle adaptée aux diodes laser DBR à deux sections a été utilisée et améliorée en considérant les variations du facteur de Henry α avec la densité de porteurs dans la zone active. La largeur de mode $\Delta\nu_{L0}$ est exprimée en (40) par une modification de la formule classique de Henry, en tenant compte des structures modernes des laser DBR à deux sections à puits quantiques multiples.

$$\Delta\nu_{L0} = \frac{R_{sp}|C|^2}{4\pi P} \left\{ \text{Re} \left[\left(1 + \frac{\frac{\delta}{\delta\omega} \text{Log}(r_{DBR})}{\frac{\delta}{\delta\omega} \text{Log}(r_{fre})} \right) C^* \right] \right\}^{-2} \quad \text{avec} \quad C = \frac{1 + j \cdot \alpha}{1 + \frac{1}{2} j \cdot G_\omega} \quad \text{et} \quad G_\omega = v_g \frac{\delta g}{\delta\omega} \quad (40)$$

R_{sp} représente l'émission spontanée, P le nombre de photons, r_{DBR} et r_{fre} représentent respectivement les coefficients de réflexion côté section DBR et côté zone active, α le facteur alpha de Henry, ω la pulsation optique, g le gain modal et v_g la vitesse de groupe dans la cavité active. Les effets sur la largeur de mode du bruit quantique et du bruit thermique dues à l'électronique ont aussi fait l'objet d'une étude spécifique à travers les termes $\Delta\nu_{NN}$ et $\Delta\nu_T$. La largeur spectrale totale s'exprime alors par :

$$\Delta\nu_L = \Delta\nu_{L0} + \Delta\nu_{NN} + \Delta\nu_T \quad \text{avec} \quad \Delta\nu_{NN} = 2e \left(\frac{\delta\omega}{\delta I_{DBR}} \right)^2 I_{DBR} \xi \quad \text{et} \quad \Delta\nu_T = \frac{4kT}{R} \left(\frac{\delta\omega}{\delta I_{DBR}} \right)^2 \xi \quad (41)$$

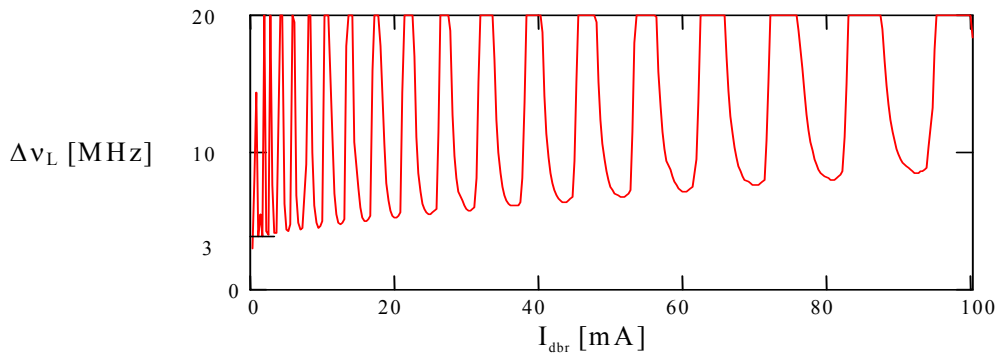


Fig.20 Simulation de la largeur de mode d'un laser DBR à deux sections en fonction du courant de Bragg par le modèle des lignes de transmissions.

Les simulations ont été effectuées par la méthode des lignes de transmission [B19] appliqués aux structures DBR à deux sections. L'accordabilité, le taux de rejection de mode secondaire, SMSR, *Side Mode Suppression Ratio* et la largeur spectrale de mode (montré sur la figure 20) ont été calculés.

Effets thermiques dans les sources optiques laser en barrette pour réseaux de télécommunications DWDM : effet sur le chirp.

[CI17]

Suite l'expérience acquise par l'étude des effets thermiques dans les lasers à semiconducteurs de différente structure, en 1998 lors d'un marché d'études avec France Télécom dans le cadre du GIE entre France Télécom et Alcatel Opto+ j'ai entrepris des recherches sur des barrettes de lasers DFB et DBR dédiés aux applications de multiplexage dense en longueur d'onde, DWDM. Il s'agissait d'une étude à la fois expérimentale, par la mesure du chirp, et théorique par la simulation des phénomènes thermiques internes aux barrettes dans le but d'évaluer les variations de longueur d'onde en considérant la contrainte de l'espacement entre canaux DWDM, 50 GHz ou 100 GHz. Le paramètre technologique était la distance minimale entre lasers permettant d'augmenter la densité d'intégration de ces composants.

Le multiplexage en longueur d'onde dense DWDM exploite l'énorme débit de transmission de la fibre optique, grâce à plusieurs lasers monofréquence émettant à des longueurs d'ondes différentes sur une même fibre optique. Le nombre de canaux utilisables sur la fenêtre de transmission de la fibre optique et donc la capacité de la liaison est directement lié à l'espacement entre les longueurs d'onde. D'où la nécessité de maîtriser parfaitement la fréquence des lasers utilisées. Les composants monolithiques DWDM sous forme de barrettes de sources lasers multicolores, constituent une des solutions pour générer un multiplex en longueur d'onde. L'intérêt de cette solution se situe dans la réduction du volume de tels systèmes par l'intégration de plusieurs sources sur un même support.

Cette technologie entraîne des contraintes sévères :

- 1) Sur les caractéristiques spectrales : précision et stabilité des longueurs d'ondes d'émission, l'objectif étant l'obtention de canaux, espacés de 50 GHz et 100 GHz, modulés à des débits jusqu'à 10 Gb/s par modulation externe.
- 2) Sur la fabrication : nécessité de l'intégration monolithique des sources. Le contrôle de la stabilité en température des longueurs d'onde est crucial, en effet l'intégration monolithique en barrettes induit des effets d'interaction thermique entre lasers voisins lors d'un fonctionnement simultané.

Une partie du travail a été effectuée à Supélec par moi-même et par un groupe d'étudiants de III année en projet, et une partie dans les laboratoires du CNET à Bagneux et ensuite d'Opto+ à Marcoussis par Hélène Gueguin qui était une des étudiantes du projet et qui a poursuivi ce travail lors de son stage de fin d'études en 1999.

Des simulations ont été effectuées à partir de modèles adaptés. Des caractérisations expérimentales ont été effectuées sur les caractéristiques spectrales, déviation en longueur d'onde et chirp, fonction des effets thermiques dus aux interactions entre lasers d'une même barrette.

5.3.1.4 Modélisation thermique des barrettes de lasers DFB et DBR : optimisation des paramètres géométriques.

Dans une première phase du projet on a effectué une résolution analytique de la propagation de la chaleur dans une barrette de diodes laser DFB en utilisant un modèle inspiré de Nakwaski [B20].

Dans cette méthode analytique chaque diode est modélisée avec la méthode des largeurs effectives de flux de chaleur, on ramène ainsi chaque diode à une source de chaleur surfacique uniforme placé sur le dissipateur thermique. La température en régime stationnaire est déterminée à l'intérieur du dissipateur de conductivité thermique finie dans les trois dimensions. Les conditions aux limites sont strictement identiques à celles rencontrées dans le modèle de Joyce et Dixon, la différence réside dans la prise en compte des interactions thermiques dans l'expression de la largeur effective. La température moyenne

sous le laser de surface $W \times L$, schématisé sur la figure 21, s'obtient en intégrant les contributions de chaque laser à l'élévation de la température sur cette surface. Il faut ensuite déterminer l'influence des grandeurs géométriques sur l'élévation de la température. Les paramètres sont : l'épaisseur du dissipateur D , sa largeur B , la distance entre les lasers C et la longueur de la cavité L .

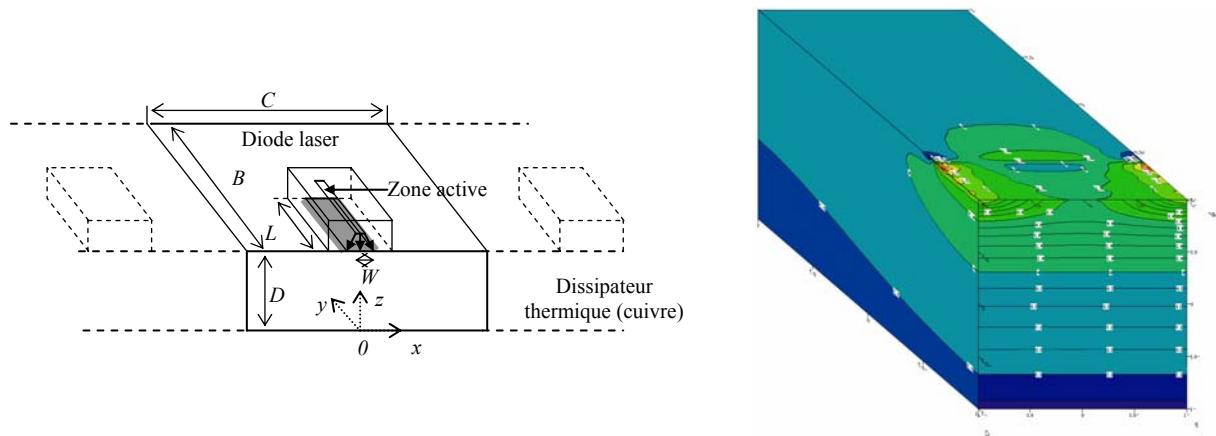


Fig. 21 Modèle des réseaux de diodes pour la résolution analytique et distribution de la chaleur entre deux lasers de la barrette.

La figure 22 montre les courbes d'élévation de la température par rapport à une position fixe dans le laser (point $(0,0,D)$). Les grandeurs géométriques du laser varient d'un facteur 5, de part et d'autre de leurs valeurs nominales, les autres grandeurs étant fixes.

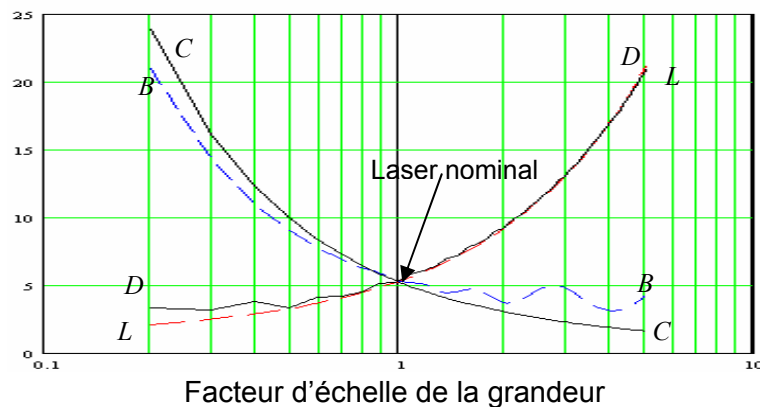


Fig. 22 Variation de l'élévation de température en $(0,0,D)$ selon les paramètres géométriques du réseau de diodes laser

La résolution analytique de la propagation de la chaleur dans une barrette de diodes laser est réservée à des cas relativement simples. Pour aborder le problème de façon plus fine et systématique des simulations numériques par éléments finis utilisant un logiciel de résolution d'équations aux dérivées partielles, Matlab PDE, ont été effectuées, en mettant en relief l'influence des caractéristiques géométriques des diodes lasers sur la propagation thermique et par conséquent sur les caractéristiques spectrales. Les simulations numériques ont été accompagnées de plusieurs séries d'expériences destinées à contrôler et affiner le modèle. Compte tenu de la symétrie par translation des barrettes utilisées, avec une longueur de cavité très grande vis-à-vis des dimensions transverses, les effets de bord sur les facettes verticales ont été négligés dans un premier temps. Le problème 3D a donc été ramené à un problème 2D [CI17].

La distribution de la température obtenue d'une barrette de 5 lasers calculée, en utilisant la méthode des éléments finis est montré sur la figure 23. L'influence des lasers adjacents en éteignant un ou plusieurs lasers dans la barrette a aussi été étudié.

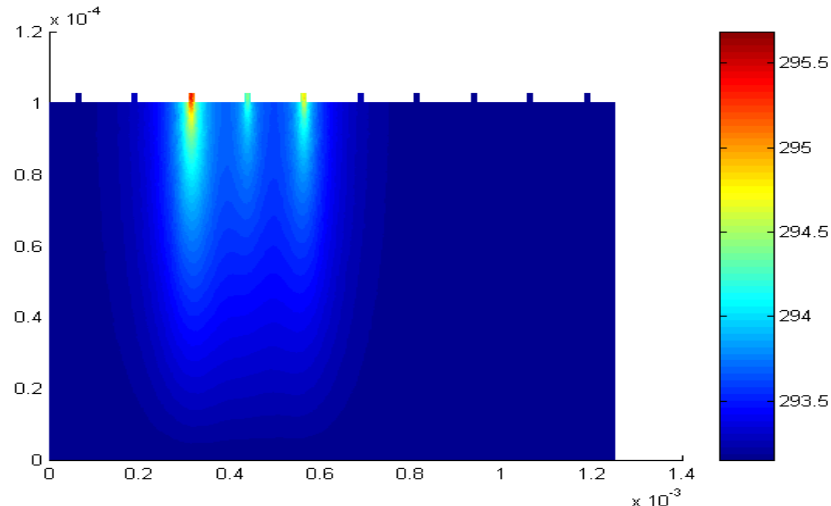


Fig.23 Distribution de la température dans le cas de 3 lasers allumés avec une puissance dans chaque laser de 9mW.

A partir de ces résultats il a été possible d'estimer l'interaction thermique des lasers adjacents à un laser spécifié et de calculer les impédances thermiques mutuelles.

Cette analyse analytique et numérique a été transposée à d'autres types de réseaux de lasers, les réseaux de VCSELs, les effets thermiques étant pour de tels lasers un point particulièrement critique. Une démarche analytique similaire a été effectuée pour des barrettes de 12 VCSEL dans le cadre du projet RMNT SHAMAN (voir plus loin).

5.3.1.5 Mesure des déviations de fréquence des barrettes DFB et DBR : vérification de spécifications des canaux DWDM.

Dans le cadre de ce programme de recherche on a effectuée des mesures de la dérive de la longueur d'onde sous l'influence de l'alimentation de lasers voisins et du *chirp* à basse et moyenne fréquence sous différentes conditions d'alimentation des lasers et de température.

Une des difficultés des expériences sur les barrettes lasers DFB et DBR fournies par Opto+ consistait à alimenter simultanément tous les lasers de la barrette afin d'observer les influences mutuelles d'origine thermique. On a pour cela réalisé un système comprenant de pointes de contact adapté aux dimensions des supports laser fournis avec une distance entre contacts de 125 μm . Un transfert sur plaque de circuit imprimé a été effectué de façon à pouvoir souder les pointes. Avec ce système on pouvait alimenter jusqu'à 8 lasers simultanément. Les mesures ont été effectuées par un analyseur de spectre optique de Fabry-Pérot, adapté à la fenêtre 1550 nm. Le dispositif expérimental est montré à la figure 25.

Tout d'abord la dérive en fréquence statique en fonction du courant de polarisation de la zone active du laser sous test et des lasers adjacents a été mesurée. Pour la barrette DBR on a trouvé une dérive en fréquence de 280 MHz/mA dû au courant d'auto-injection de la zone active, et de 140 MHz/mA dû à l'allumage d'un laser premier voisin et de 100 MHz/mA pour l'allumage d'un second voisin. Les valeurs trouvées étaient tout à fait en accord avec celles trouvées par simulation. On constate un comportement "linéaire" de l'influence des lasers voisins, au sens que les incréments de dérive en fréquence varient proportionnellement au nombre de lasers adjacents allumés. En plus l'accord entre mesures globales et mesures cumulées était très bon. Pour la barrette DFB, la dérive due à l'auto-injection, présente un comportement moins linéaire, et une valeur plus forte, 600 MHz/mA. Ceci peut s'expliquer par les phénomènes de gain nonlinéaire plus importantes dans les lasers DFB que dans les lasers DBR. L'influence des lasers voisins dans la barrette DFB est comparable à celle de la barrette DBR, 150 MHz/mA, du à l'allumage d'un premier voisin et 85 MHz/mA pour un second voisin, légèrement moins forte que dans le cas DBR.

L'utilisation de ces barrettes de laser était prévue dans les systèmes DWDM, avec émission sur un peigne de 8 ou 16 longueurs d'onde espacées de 100 GHz, et modulées en externe avec une polarisation du laser fixe. On remarque qu'en cours d'opération les effets importants sont ceux relatifs aux lasers voisins en régime de commutation. Au pire cas si l'on considère une barrette de 9 lasers espacés de 125 μm , la dérive en fréquence du laser central du à l'allumage de tous les voisins à un courant de 100 mA peut être estimé à 40 GHz pour les barrettes DBR et DFB, ce qui est à peine acceptable pour une fenêtre de 100 GHz où l'on tolère habituellement une dérive maximale de quelques dizaines de GHz.

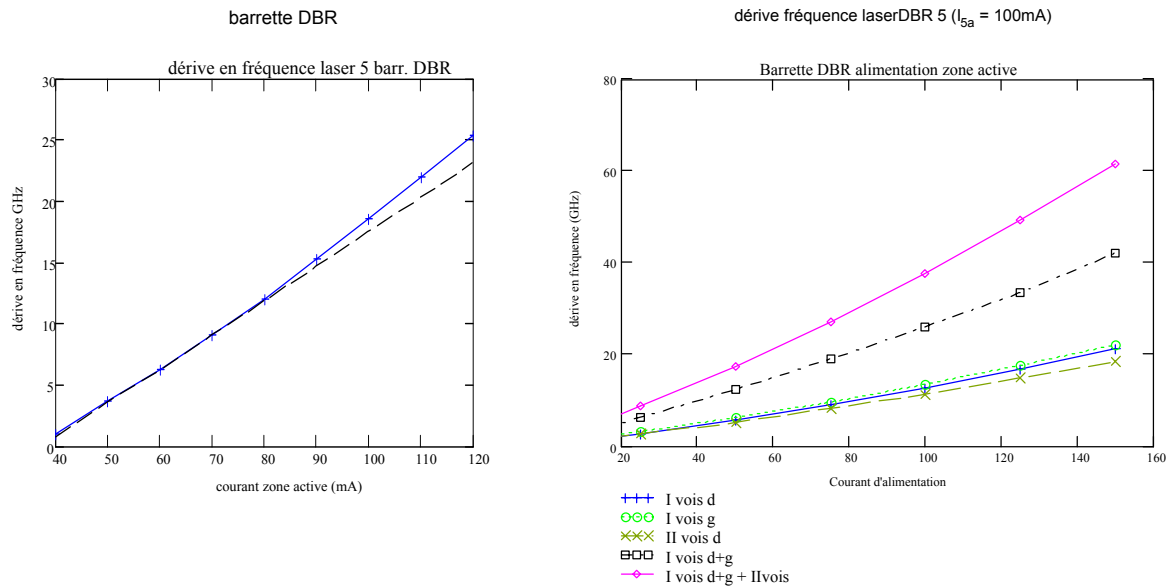


Fig. 24 (gauche) Dérives statiques en fréquence due à l'auto-injection comparées à la pente théorique. (droite) dérive en fréquence du laser sous l'influence de la polarisation des lasers adjacents.

Les mesures dynamiques de chirp ont été effectuées sous modulation sinusoïdale directe, dans une gamme de fréquences correspondant aux constantes de temps thermiques entre 10 kHz et 10 MHz.

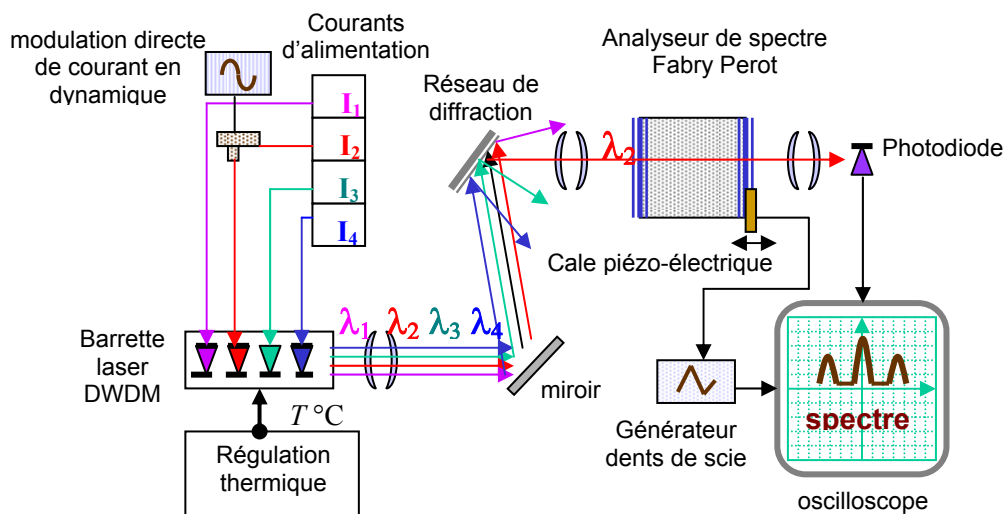


Fig. 25 Dispositif expérimental de mesure des déviations de longueur d'onde statiques et dynamiques pour des barrette DFB et DBR pour DWDM

La réponse harmonique du chirp d'origine thermique a été mesurée sur les barrettes de lasers DFB et DBR. Les courbes à figure 26 montrent une structure caractéristique composée d'un maximum suivi d'un minimum dans la gamme de fréquence 1 kHz – 100 MHz. Ces caractéristiques sont des signatures des différentes constantes thermiques dues aux interfaces thermiques, ces contributions pouvant avoir des signes positifs ou négatifs. L'effet le plus important sur la forme du chirp est celui du à l'auto-échauffement. L'allumage des lasers voisins n'affecte pas considérablement la forme du chirp alors que comme décrit précédemment son effet est important sur les variations statiques de fréquence.

L'ajustement des mesures de chirp par des fonctions de transfert FM d'origine thermique [B21] a été effectué par des termes de la forme :

$$H_{TH}(f) = -K_{TH} \left[\frac{2}{3\sqrt{jf/f_c}} \left(\tanh(\sqrt{jf/f_c}) + \tanh(1/2\sqrt{jf/f_c}) \right) \right] \quad (42)$$

D'après les ajustements on constate qu'il faut au moins trois termes correspondant à autant de paramètres différents, fréquences de coupure thermique f_{cT} et amplitude K_{TH} , afin de reproduire les résultats expérimentaux, ceci donne une indication de la complexité des phénomènes.

Pour les spécifications DWDM décrites plus haut le *chirp* d'origine thermique des barrettes testées ne constitue pas un facteur pénalisant à des fréquences de commutation inférieures à 100 MHz, au-delà c'est le *chirp* de nature électronique, adiabatique, qui prend le dessus avec des valeurs plus importantes.

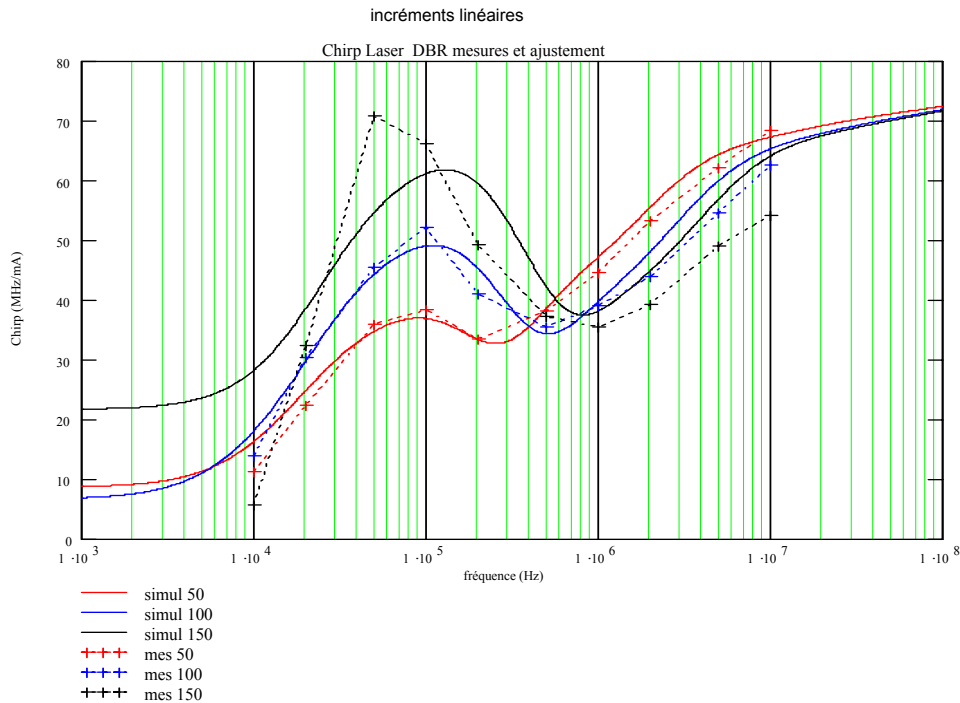


Fig. 26 Mesures de chirp et ajustement sur un des lasers de la barrette DBR en faisant varier le courant dans la zone active $I_a = 50, 100, 150$ mA dans la gamme de fréquences de modulation (10 kHz – 10 MHz).

5.4 Chaos dans les lasers et dans les oscillateurs : une approche pluridisciplinaire

Je me suis intéressé depuis plusieurs années aux phénomènes de chaos déterministe dans les oscillateurs notamment en effectuant des analogies avec les lasers. L'apparition de phénomènes chaotiques dans différents systèmes a fait que j'ai étudié ces phénomènes dans des contextes variés. Je pense que l'application de certaines propriétés de ces phénomènes et aussi leur maîtrise dans des systèmes pratiques sera d'une grande importance dans le futur.

5.4.1 Chaos induit par la rétroaction optique dans les lasers à semiconducteurs

[R6], [CN4], [CN5], [CN6], [CN8]

On a constaté lors de l'étude des effets de la rétroaction optique sur les lasers à semiconducteurs qu'une augmentation du taux de rétroaction pouvait faire apparaître des phénomènes dits de *coherence collapse* [B22], il s'agit de chaos spectral du laser à semiconducteurs en présence de rétroaction optique jouant le rôle de seconde cavité extérieure au laser.

L'étude du *coherence collapse* constituait une partie du travail de thèse de Christelle Birocheau, j'ai contribué à ces recherches notamment sur les points concernant le chaos et ses analogies électroniques. Une étude intéressante consistait à analyser l'évolution de l'intensité et de la largeur spectrale près du seuil d'un laser à semiconducteurs en présence de cette rétroaction optique.

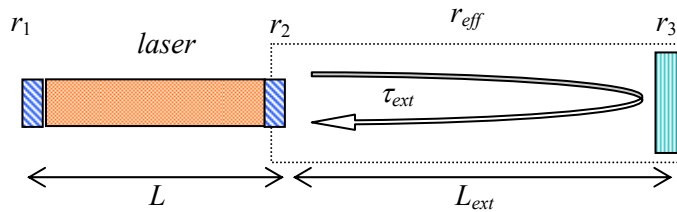


Fig. 27 Configuration des conditions de rétroaction optique issue d'une cavité externe à un laser à semiconducteur.

La rétroaction optique modifie considérablement les propriétés spectrales des lasers. Dans certaines conditions de réinjection, une diminution de la largeur spectrale peut être obtenue. En revanche, des niveaux de réinjection typiquement de -40 dB à -10 dB induisent une perte de cohérence progressive amenant au *coherence collapse*, avec des largeurs spectrales de quelques GHz.

Les phénomènes chaotiques près du seuil ont été modélisés à l'aide d'une équation d'évolution portant sur le champ électrique $E(t)$, incluant un terme nonlinéaire de type Van-der-Pol ou Landau [B23] modifiée par la présence de la rétroaction optique avec une source de bruit de Langevin :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}(1 + j\alpha) \cdot (G_0 - B \cdot E^2)E + K \cdot E_{fb}(t, \tau) + F_E(t) \quad \text{et} \quad \frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_n} - G|E|^2 \quad (43)$$

où α est le facteur de Henry, $K \cdot E_{fb}(t, \tau)$ la fonction représentant la rétroaction, K désigne le niveau énergétique de la rétroaction, τ la durée d'un aller-retour de la lumière dans la cavité externe, G_0 est le gain net du laser, B est un coefficient de saturation. $F_E(t)$ est la force de Langevin associée au bruit d'émission spontanée du champ laser, définie par $\langle F_E(t) F_E^*(t') \rangle = 4D_{EE} \delta(t - t')$ où D_{EE} représente le facteur de diffusion. L'équation des fluctuations du nombre de porteurs N complète le modèle, I est le courant d'injection, e la charge de l'électron, τ_n est le temps de vie des porteurs, G le gain linéaire du laser dans l'hypothèse adiabatique.

L'effet de la rétroaction est modélisé en augmentant le facteur de diffusion D_{EE} du laser au voisinage du seuil et en changeant le gain G_0 en $G_0 - K \cdot \cos \Psi$ uniquement au-dessus du seuil où Ψ est le déphasage induit par la cavité externe. L'augmentation de D_{EE} revient à considérer la rétroaction optique comme une réinjection de bruit blanc.

Des mesures ont été effectuées dans le régime de *cohérence collapse* sur un diode laser à semiconducteurs de type BH à une longueur d'onde de 1550 nm et sur un laser de type DCPBH 1300 nm. Elles concernent l'évolution de la largeur spectrale avec le courant de polarisation.

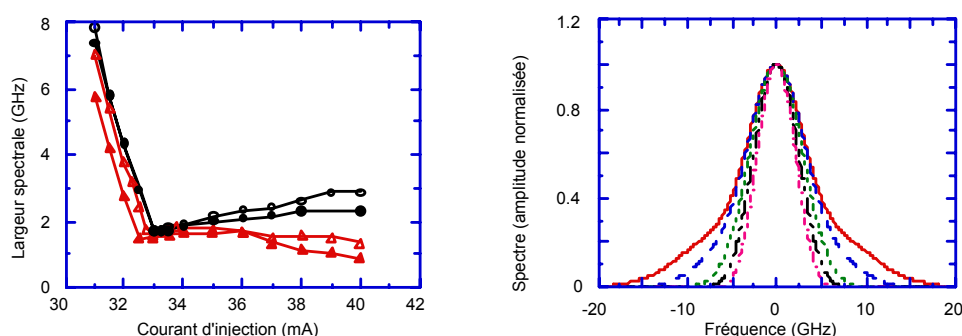


Fig 28 Régime de perte de cohérence (*coherence collapse*). (gauche) Largeur spectrale d'une diode Laser 1310 nm en fonction du courant sans rétroaction appréciable (triangles) et avec différents taux de rétroaction ; (droite) Spectre du mode s'élargissant en fonction des taux de rétroaction.

5.4.2 Analogie avec le chaos d'oscillateurs électroniques, synchronisation d'un ensemble d'oscillateurs chaotiques.

On peut chercher une analogie entre les phénomènes chaotiques dans les lasers et dans les oscillateurs électroniques. Un laser est un oscillateur et en tant que tel peut être caractérisé par des équations différentielles comportementales, par exemple l'équation de Van der Pol, souvent utilisée pour décrire les lasers et les oscillateurs électroniques, présente des comportements chaotiques.

La facilité de la mise en évidence des phénomènes chaotiques dans les circuits électroniques analogiques m'a incité à proposer des projets de réalisation pratique à des élèves de première et deuxième année à Supélec.

Dans ce cadre le phénomène de synchronisation du chaos a été utilisé pour le cryptage d'une liaison numérique. Deux circuits ont servi à l'étude du chaos en électronique : le circuit de type Colpitts [B24] et le circuit de Chua [B25], montrés sur la figure 29. Un des objectifs était d'obtenir une synchronisation de ces circuits oscillateurs au comportement chaotique. Lorsque le circuit chaotique source, celui qui brouille le signal transmis et le circuit chaotique cible, celui qui est à l'œuvre dans la réception, sont synchronisés, l'information peut être extraite du chaos par simple soustraction des signaux.

Le système d'équations non linéaires de l'oscillateur Colpitts est le suivant :

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dV_{ce}}{dt} &= I_l - \beta I_b \left[\exp\left(\frac{V_{be}}{V_{th}}\right) - 1 \right] & C_2 \frac{dV_{be}}{dt} &= -\frac{(V_{ee} + V_{be})}{R_{ee}} - I_l - I_b \left[\exp\left(\frac{V_{be}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \\
 L \frac{dI_l}{dt} &= V_{cc} - V_{ce} + V_{be} - R_l I_l
 \end{aligned} \tag{44}$$

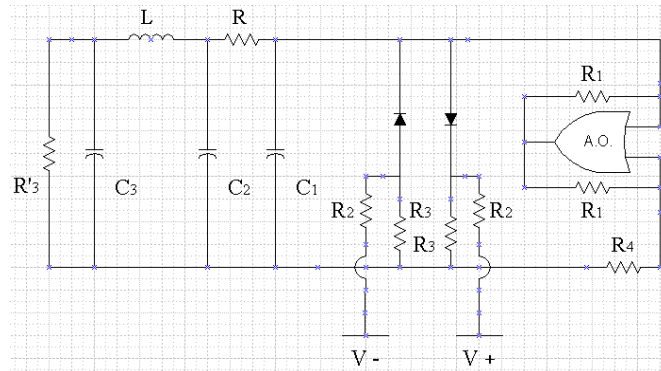
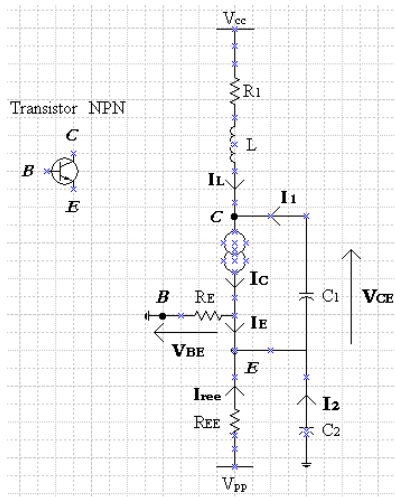


Fig 29 Circuits électroniques chaotiques : (gauche) oscillateur chaotique de Colpitts, (droite) oscillateur chaotique de Chua.

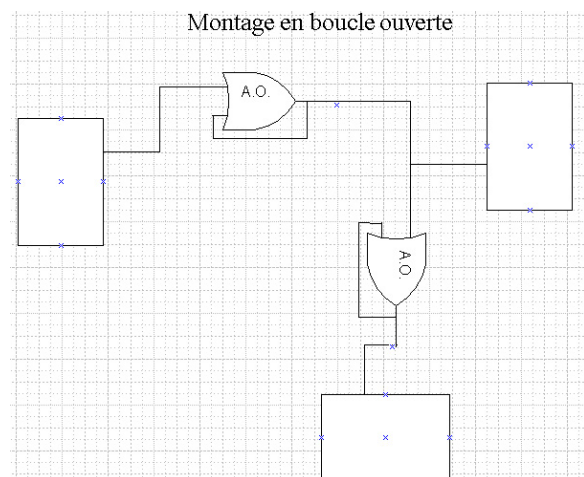
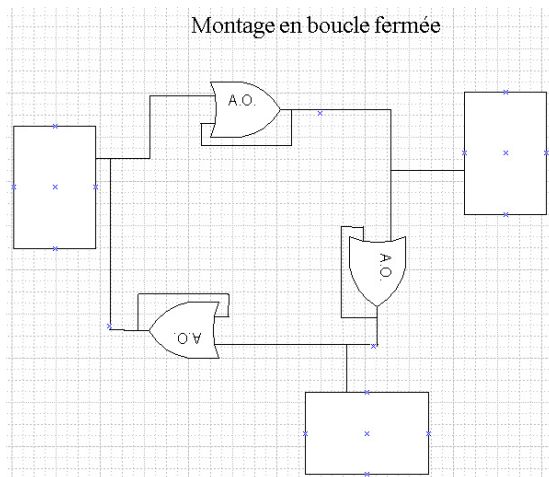


Fig 30 Différentes configurations de couplage entre oscillateurs chaotiques.

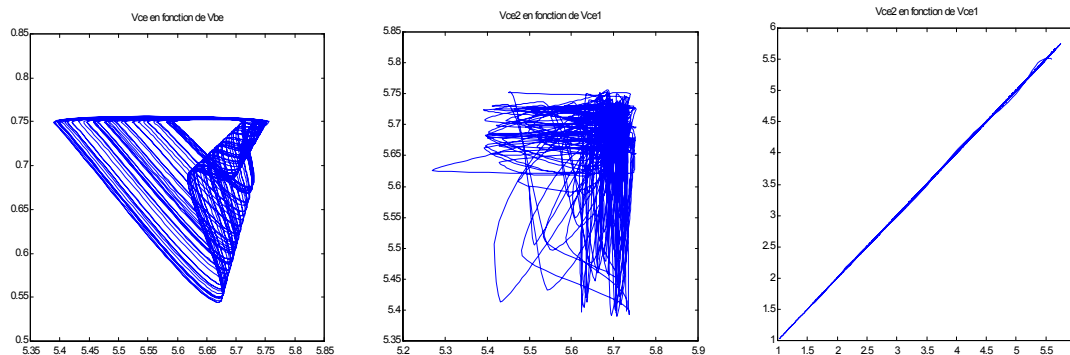


Fig. 31 Circuit oscillateur Colpitts portrait de phase: (gauche) attracteur étrange, (centre) hyperchaos, couplage de circuits non synchronisés, (droite) synchronisation de circuits.

A l'issue des différentes expériences, on a constaté que le nombre et la configuration, voir figure 30, des circuits connectés influence la synchronisation. Pour le couplage en chaîne de trois oscillateurs les portraits de phase des tensions prélevées sur les couples de circuits adjacents donnent des droites, voir figure 31, ce qui monte une synchronisation complète. Le couplage en anneau des quatre circuits provoque aussi la synchronisation. Ceci montre que la synchronie d'ensemble est d'autant meilleure qu'il y a de symétries de couplage dans la conformation des circuits. Les oscillateurs s'accordent deux à deux, et la synchronie collective s'en trouve renforcée. En outre, le fait que le passage d'une topologie en chaîne de trois oscillateurs à une topologie triangulaire dégrade la qualité des résultats observés tend à montrer que la parité du nombre de circuits mis en jeu joue un rôle dans ce genre de phénomènes collectifs. Certaines symétries seraient donc favorisées, parce que permettant une synchronie locale.

5.4.3 Analyse et caractérisation croisée de chaos des diodes lasers et oscillateurs et des solitons photoréfractifs [CN22], [CN27]

Dans le cadre du Projet Pluri Formation (PPF) sur le chaos, démarré en 2003, en collaboration avec les équipes de Supélec à Metz nous avons entamé une activité de recherche sur la caractérisation de phénomènes chaotiques d'un côté dans les oscillateurs électriques et les lasers à semiconducteurs et de l'autre dans les solitons optiques spatiaux. L'objectif est de trouver des analogies dans les méthodologies de caractérisation et de mettre en évidence des phénomènes chaotiques complexes : hyperchaos, phénomènes collectifs cohérents, synchronisation du chaos et oscillations spatio-temporelles. Le projet vise à développer en commun des études de modélisation sur le chaos en optoélectronique dans ces deux applications.

Les différents travaux qui pour l'instant ont essentiellement porté sur la définition et la mise en place des outils ont permis de montrer, ainsi qu'il avait été pressenti lors de la proposition de ce projet, les similitudes entre les différents supports sur lesquels le chaos est analysé, les solitons photoréfractifs et leurs interactions d'un côté et les oscillateurs autonomes chaotiques et leur mise en couplage de l'autre.

En outre on a fait le choix d'étudier le chaos dans les circuits électroniques pour deux raisons :

- 1) Les résultats vont servir d'outil de base pour développer une méthode d'étude du chaos dans les solitons.
- 2) Il existe de nombreux logiciels de simulation de circuits électroniques qui vont permettre de faciliter cette étude et aussi parce que beaux travaux ont déjà été réalisés circuits.

Le désordre qui apparaît dans les gerbes de solitons est du à la présence de nœuds d'interactions qui sont des zones où se produisent une ou plusieurs interactions, ces nœuds étant reliés entre eux par les solitons, formant ainsi un réseau, non comme une distribution périodique, mais au sens de l'interaction, des points interagissent entre eux. Les nœuds comportent une propension à se mettre dans une configuration chaotique. Mais le chaos n'y figure pas de manière explicite comme ce serait le cas du chaos déterministe avec les systèmes dynamiques temporels. Il faut sans doute développer un nouveau formalisme pour ce type de chaos spatial obtenu par les interactions à quelques solitons [CN22]. On retrouve aussi certaines formes d'hyperchaos et de synchronisation dans ce chaos de solitons.

La difficulté consiste à trouver une analogie entre les configurations spatiales des solitons photoréfractifs et par exemple la dynamique temporelle des réseaux d'oscillateurs. Une piste consiste à analyser le chaos dans les lasers qui peuvent être modélisés par des équations de Maxwell-Bloch [B33] ou de Lorenz et de faire interagir spatialement N lasers chaotiques. Je reviendrai sur ce point dans les perspectives.

5.5 Liaisons optiques infra-rouge en espace libre et par fibres optiques

5.5.1 Etude du canal de communication optique infrarouge en espace libre dans le domaine de l'automobile.

L'utilisation du rayonnement optique infra-rouge en espace libre pour transmettre des informations est une alternative aux communications par ondes radio [B26], je me suis intéressé à plusieurs systèmes de communications infra-rouge avec des applications dans le domaine de l'automobile. Ces recherches ont été effectuées dans le cadre de programmes de recherche européens.

Plusieurs systèmes de communications utilisant le rayonnement optique infrarouge ont été envisagés auparavant dans le domaine de l'automobile et de l'infrastructure routière. Cette technologie a été envisagée pour des panneaux de signalisation intelligents, pour le guidage de véhicules en convoi et pour la transmission d'informations routières.

On peut citer le système *AUTOGUIDE* qui a été développé à Londres qui consiste en un réseau de balises, émettant à courte distance, reliées à un centre de contrôle. Tous les véhicules équipés du système, et passant par une balise à un temps donné, reçoivent le même type d'information, par une liaison à l'aide d'impulsions infrarouge avec des débits allant jusqu'à 500 kbit/s. Les informations, calculées à partir des données sur le trafic en temps réel, portaient sur la localisation, le plan routier, et les indications routières,.

Le système *LISB*, *Light and Information System Berlin*, était basé sur la technologie *ALI-SCOUT* et a été mis en oeuvre à Berlin en 1990, 250 balises ont été installées. Ce système a été développé par Siemens et Bosch et utilisait des balises infrarouge puissantes pour des communications horizontales *half-duplex*, la portée de transmission peut atteindre 100 mètres [B27].

5.5.1.1 Définition du canal de communication infrarouge en espace libre pour l'automobile [CI3].

Le groupement d'intérêt économique TREGIE, comprenant entre autres les sociétés automobiles RENAULT et PSA participant au programme de recherche Esprit PROMETHEUS ont demandé à Supélec de participer dans le programme de recherche PROCOM afin de spécifier différentes technologies de communication entre véhicules et entre les véhicules et l'infrastructure routière. Je suis intervenu dans PROCOM dans la phase de définition pour étudier et proposer les spécifications du canal de transmission optique infrarouge en espace libre pour les applications automobile.

On a étudié un type de transmission utilisant comme support le rayonnement optique dans le proche infra-rouge à l'aide de sources émettant de façon directive. Dans les applications dans le domaine de l'automobile, l'utilisation de diodes électroluminescentes, DEL, ont été préconisées, en effet leur coût était inférieur à celui des laser à semiconducteurs et leur durée de vie supérieure. En associant plusieurs sources DEL dans un seul émetteur on peut atteindre des puissances convenables avec des diagrammes de rayonnement pouvant être adaptés selon l'application désirée. La rapidité des composants émetteurs et récepteurs étaient tout à fait compatibles avec les débits d'information nécessaires pour les communications courte distance et avec les scénarios envisagés, convoi de véhicules, systèmes de sécurité ou gestion des carrefours. La portée dans ce type de système est limitée par le rapport signal sur bruit qui est fonction du type d'émetteur, du récepteur et du milieu que traverse le rayonnement infrarouge. Ce type de transmission est très sensible aux conditions atmosphériques, les perturbations extérieures, comme le brouillard où le rayonnement solaire intense, peuvent affecter d'une façon importante la qualité de la transmission.

Les problèmes de fiabilité et de coût ont aussi été abordés, ils jouent un rôle important sur les équipements devant fonctionner sous différentes conditions atmosphériques à des débits de l'ordre du Mbit/sec. [CI3].

5.5.1.2 Balises infrarouge pour péage d'autoroute pour communications duplex. [CI6], [CI7]

En 1990 le groupe DACAR du programme de recherche européen DRIVE a fait appel à nos compétences pour le développement et l'évaluation des équipements de transmission infra-rouge destinés aux systèmes de péage sans arrêt en collaboration avec l'équipementier VALEO. Des tests ont été effectués et des améliorations ont été apportés. J'ai été invité pour présenter ces travaux à la conférence finale du programme DRIVE [CI6].

Le équipements développés avec la société Valeo pour la communication entre l'infrastructure et un véhicule étaient constitués par trois types de balises :

- 1) *Mileage beacon* : communication verticale simplex à l'aide de messages courts pour l'assistance à la conduite. Cette balise a une surface de couverture faible.
- 2) *Route guidance beacon* : communication verticale duplex pour la navigation. Cette balise possède une plus grande surface de couverture.
- 3) *Traffic light beacon* : il s'agit d'une balise disposée comme un feu tricolore.

Les trois balises du système étaient compatibles, utilisaient le même format de communication, le débit pouvant atteindre 600 kbit/sec. La longueur de chaque message est fonction du type de balise. Au niveau de la couche physique de communication, qui est ici constituée par la couche électrique d'interface vers les signaux infrarouges émis, la modulation préconisée étaient de type bi-phase Manchester.

Des communications *simplex* étaient réalisées entre la balise émettrice, *mileage*, placée sur un portique et un récepteur embarqué dans le véhicule. Les messages courts étaient constituées d'informations comme la localisation géographique et la direction. Des communications *half-duplex* étaient réalisés à l'aide d'une balise émettrice guidance placée sur un portique et un émetteur/récepteur embarqué dans le véhicule. Des communications *full-duplex* étaient réalisées avec le même équipement que dans le cas du *half-duplex* mais avec des protocoles de communication modifiés. Le format du message était choisi de telle façon qu'après un signal de synchronisation un message était envoyé en retour.

Pour un véhicule passant sous un portique certains messages peuvent être reçus de façon incorrecte, leur nombre augmentant avec la vitesse du véhicule. Ces erreurs sont plus fréquents lors de l'entrée et de la sortie du véhicule dans le faisceau infrarouge émis par la balise, dans ce cas le rapport signal sur bruit n'est pas suffisant pour une bonne détection. Des systèmes de correction d'erreurs ont aussi été envisagés.

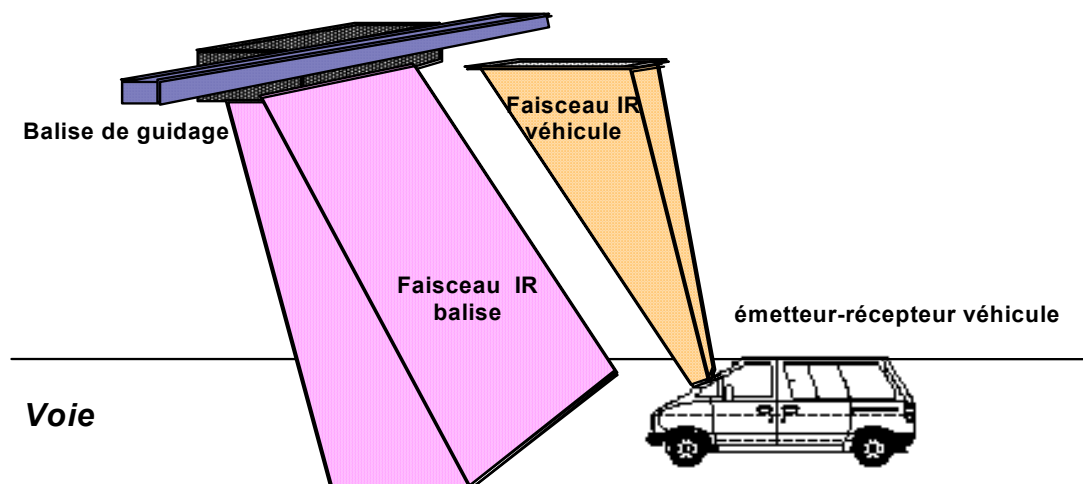


Fig. 32 Système de communication par faisceau optique Infra Rouge pour péage d'autoroute à l'aide de balise spécialisée dans le cadre du projet européen DRIVE DACAR.

5.5.2 Etudes des fibres optiques pour télécommunications.

5.5.2.1 Etude de polariseurs pour fibres optiques monomodes [CI5], [CN3].

Cette étude a été effectuée lors d'une collaboration avec Bernie Gumarang, chef du département télécommunication, de l'Université De La Salle de Manille aux Philippines, qui a effectué un séjour dans notre laboratoire en 1989. Je lui a proposé l'étude détaillée des états de polarisation dans un polariseur à fibre optique monomode [CN3]. Ces dispositifs sont très utilisés dans les systèmes de télécommunications par fibres optiques où le contrôle de l'état de polarisation est crucial. Ils offrent l'avantage de la simplicité, par rapport à d'autres systèmes composées par exemple de prismes polarisants, en effet ces polariseurs sont obtenus simplement en enroulant plusieurs boucles de fibre optique monomode. Ces dispositifs peuvent aussi être utilisés comme contrôleurs de polarisation dans les systèmes de transmissions cohérentes utilisant la diversité de polarisation.

Nombreuses études des états de polarisation ont été effectuées sur une fibre optique monomode sous contrainte de torsion et avec courbure [B28]. Les différents états de polarisation peuvent être obtenus par des boucles en nombre et en diamètre variable utilisant de ce fait la biréfringence induite par courbure de la fibre optique monomode [B29]. Mais la conception de ces dispositifs restait plutôt empirique, une étude détaillée et systématique n'avait pas encore été effectuée.

En suivant ce principe on a calculé, étudié et réalisé des configurations simples à base de fibres optiques monomodes, afin d'obtenir différents états de polarisation. L'étude à l'aide d'analyseurs adaptés à l'infrarouge a permis d'évaluer la biréfringence induite en fonction de la géométrie du dispositif, rayon de courbure et nombre de boucles. On a cherché pour ces dispositifs les configurations donnant en sortie une polarisation rectiligne et une polarisation circulaire.

On s'est attaché à la réalisation de dispositifs équivalents à des lames quart d'onde $\lambda/4$ d'une façon reproductible et présentant de faibles pertes. Un polariseur rectiligne omnidirectionnel a été obtenu par l'adjonction de deux lames $\lambda/4$. Les calculs de l'état de polarisation en sortie du dispositif ont été effectués en fonction des différents paramètres : angle d'entrée, angle entre les systèmes de boucles et topologie du dispositif, voir Fig. 33. Ces calculs ont permis de prédire dans le cas de lames λ/m avec $4 < m < 2$ l'obtention de polariseurs rectilignes. On a montré qu'avec un système composé de deux boucles il existe toujours une direction d'orientation des dispositifs où l'on peut obtenir une polarisation rectiligne.

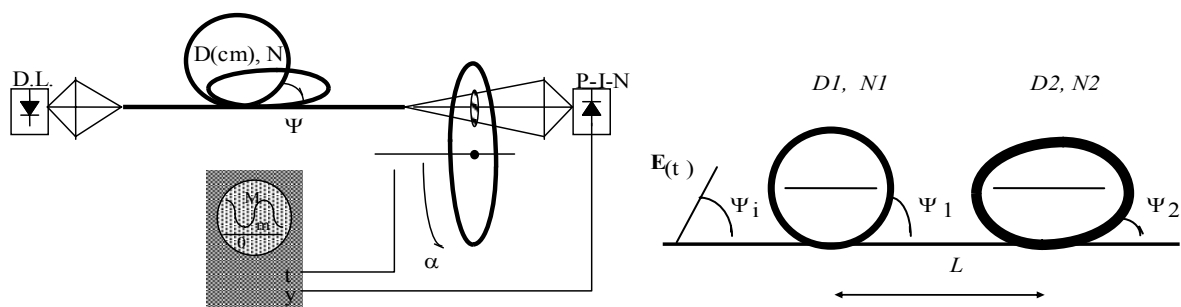


Fig. 33 (droite) Schéma du dispositif expérimental comprenant un laser à semiconducteur connecté à la fibre optique utilisée pour le système à boucles. L'analyse se fait à l'aide d'un polariseur tournant suivi d'une photodiode. (gauche) Dispositif comprenant 2 systèmes de N boucles de diamètre D faisant un angle Ψ avec le plan horizontal.

5.5.2.2 Etude des propriétés des fibres optiques en plastique PMMA [CI19], [CN15], [RS4].

Les fibres optiques en plastique, POF, *Plastic Optical Fibers*, technologie optique à faible coût, intéressent les réseaux locaux et d'accès. Des fibres optiques à gradient d'indice permettent d'améliorer la bande passante. Leurs fenêtres de transmission qui se situent dans le spectre visible permettent une utilisation plus pratique par exemple au niveau de la maintenance. Utiliser des POF dans les réseaux optiques à haut débit est aussi intéressant à cause de leur facilité d'emploi et de leur faible coût. Une forte absorption et une bande passante réduite limitent néanmoins les applications aux réseaux courte distance, avec des débits inférieurs à 100 Mb/s. Cependant, des nouvelles fibres optiques plastique à gradient d'indice et monomodes réalisées dans de nouveaux matériaux présentent des performances en constante progrès [CI19].

Compte tenu des faibles distances de transmission, la bande passante d'une POF est difficile à déterminer car l'équilibre modal n'est pas établi. Deux méthodes de caractérisation des POF ont été développées : une méthode fréquentielle et une méthode temporelle. Dans la première un laser à semiconducteurs est modulé directement par un analyseur de réseau, dans la seconde, un générateur d'impulsions optiques ultra rapides a été utilisé. La bande passante est obtenue par le calcul de la transformation de Fourier de la réponse d'un oscilloscope à échantillonnage. Nous avons développé un système permettant de déterminer la bande passante d'une POF à partir de la réponse impulsionnelle à l'aide de différentes sources laser à semiconducteurs fonctionnant par des impulsions de 20 ps à 100 ps dans les fenêtres de la lumière visible 550 nm et 660 nm et infrarouge 850 nm et 1300 nm.

Les conditions d'injection dans la fibre optique ont une grande influence sur les résultats. Les mesures sont délicates à effectuer à cause de la forte ouverture numérique, de la grande surface et de la forte absorption de ces fibres optiques. La forme d'une impulsion mesurée après passage sur une distance importante de POF s'écarte notablement de la forme gaussienne, ceci à cause des forts affaiblissements et des modes d'ordre élevé. Ce qui a comme conséquence que l'équilibre modal peut être atteint au bout d'une très courte distance dans les fibres optiques multimodes à saut d'indice en PMMA, si l'injection optique est optimisée. L'équilibre modal est primordial afin d'augmenter les performances des équipements utilisant les POF puisqu'il permet de maximiser la bande passante [CN15].

Le système développé peut très facilement s'adapter à l'étude de nouvelles technologies de POF récemment proposés comme celles avec une structure à gradient d'indice et pour d'autres longueurs d'onde par exemple dans le bleu à 500 nm.

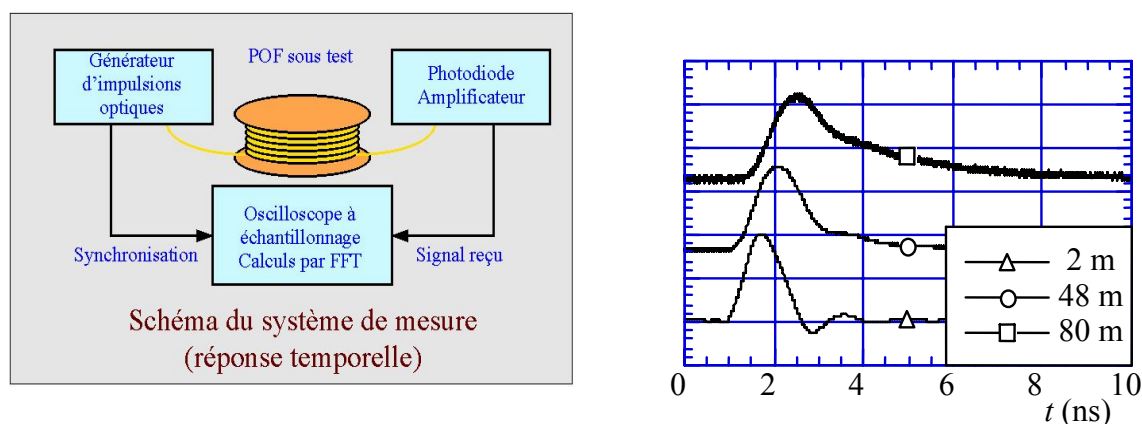


Fig. 34 (gauche) : schéma du montage, méthode temporelle. (droite) : réponse temporelle pour trois longueurs différentes de fibre optique en plastique

5.6 Recherche en simulation des systèmes de télécommunications optiques

La très forte demande de systèmes optiques poussée surtout par l'explosion de la capacité dans les télécommunications optiques est un moteur pour le développement d'outils de conception assistés par ordinateur en optoélectronique. Les systèmes deviennent de plus en plus complexes ce qui constitue une difficulté pour les concepteurs qui doivent appréhender un nombre sans cesse croissant de variables. Les outils de simulation optiques devront permettre d'analyser ces différentes variables dans une approche globale, comme c'est déjà le cas dans l'industrie de l'électronique où ces outils sont largement utilisés à tous les stades depuis la conception jusqu'à la fabrication.

Les outils de simulation sont utilisés à différents niveaux, au niveau de la planification d'un réseau optique, au niveau du système physique, au niveau des modules et au niveau du composant. Ces différents niveaux ne demandent pas la même précision dans les calculs. Les modèles mathématiques vont d'une très grande simplicité pour un réseau global avec des milliers de modules jusqu'à la résolution numérique très précise par exemple par les méthodes de résolution des équations de Maxwell nécessaires pour simuler la propagation des modes dans une fibre optique. Les systèmes optoélectroniques possèdent en général moins de composants que les circuits électroniques. Néanmoins les interactions entre les différents composants peuvent être complexes, il s'agit souvent de composants avec des fonctions encore analogiques sensibles à des paramètres comme la rétroaction, les réflexions, les résonances et les non linéarités. La conséquence de ces interactions est que la modélisation d'un système optoélectronique peut s'avérer très complexe.

Une approche système est nécessaire si on veut intégrer les modèles de composants optoélectroniques actifs et passifs utilisés dans les transmissions pour une utilisation dans des simulations de haut niveau ayant comme but ultime des outils de CAO optoélectronique. Un utilisateur attend d'un logiciel de CAO une approche globale incluant des fonctions comme l'analyse temporelle. Il cherche des modèles précis de composants et de dispositifs dans lesquels on peut faire varier les paramètres et les conditions d'utilisation, de manière à produire des résultats permettant de les comparer avec des mesures ou pouvant servir comme données à d'autres modèles.

Un simulateur de composants optoélectroniques devra présenter les spécifications suivantes :

- 1) Inclure les phénomènes principaux pouvant affecter les performances du dispositif global.
- 2) Avoir des modèles compatibles permettant les interconnexions à d'autres composants ou systèmes.
- 3) Inclure des procédures pour effectuer des traitements rapides dans les phases initiales d'un projet. Inclure si possible des modèles grands signaux avec les non linéarités correspondantes.

Plusieurs logiciels existent déjà pour la simulation des systèmes optoélectroniques ou de communications à fibres optiques mais n'offrent pas en général un langage commun.

L'introduction de nouvelles technologies optiques nécessite d'intégrer des modèles adaptés dans les outils de CAO existants. En plus du fait de la généralisation des technologies optoélectroniques pour la transmission de données à haut débit, il apparaît au niveau international un effort de normalisation qui a pour objectif de définir des technologies compatibles et un langage commun entre différents constructeurs et opérateurs, dans l'objectif d'arriver d'ici à quelques années à une interopérabilité évitant ainsi les technologies trop spécifiques et liées à un seul constructeur et à une seule application. Mais jusqu'à présent du fait des solutions optoélectroniques spécifiques aux différentes applications, il n'existe pas de méthodes et de langages de CAO optoélectronique reconnus assez largement permettant la mise en commun de modèles entre constructeurs et utilisateurs comme cela existe dans le domaine de l'électronique avec les langages tels SPICE et VHDL.

5.6.1 Simulation et optimisation d'un réseau DWDM métropolitain [CI18]

La technologie DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*, commence à être utilisée dans les réseaux métropolitains d'accès, elle se base sur des composants tels que le multiplexeur optique OADM, *Optical Add Drop Multiplexer*, et le OXC, *Optical Cross Connect*, en tant qu'éléments fondamentaux pour la gestion du réseau.

Dans le cadre d'un Contrat d'Étude Industrielle pendant l'année 1999/2000, j'ai encadré un groupe de trois étudiants de dernière année e Supélec, afin d'effectuer une étude de simulation de réseaux DWDM métropolitains. Lors de cette étude, on a été amenés à étudier la technologie DWDM, sur le plan technologique, par l'étude des différentes normes et par les différents composants disponibles par les constructeurs à cette époque.

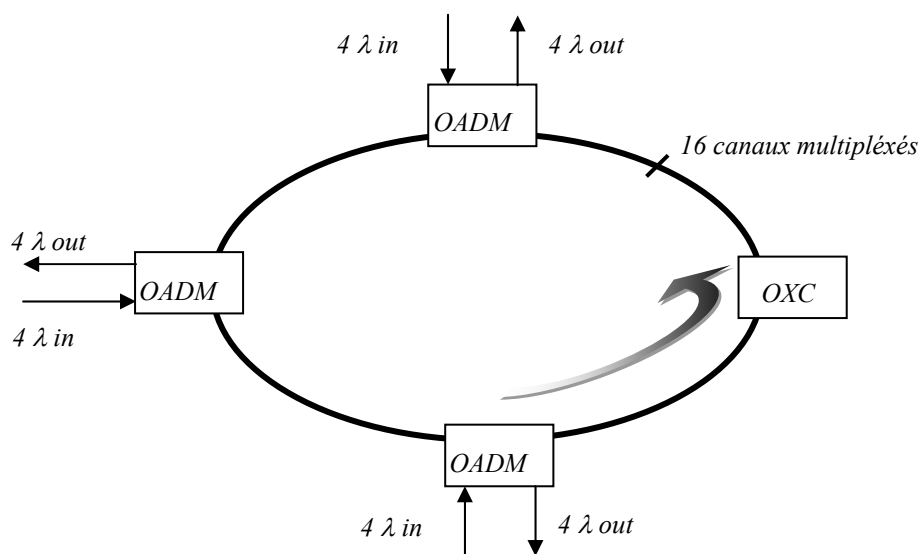


Fig 35 Structure en anneau d'une liaison WDM. A chaque OADM il est possible d'insérer et d'extraire quatre canaux. Le multiplex est constitué de 16 canaux.

5.6.1.1 Normes et classifications de composants pour réseaux DWDM métropolitains

Les normes définissent la grille des fréquences centrales des systèmes à canaux en longueur d'onde multiples avec une fréquence de référence à 193,10 THz et un espacement entre canaux de 50 GHz ou 100 GHz. Mais ces normes définissent aussi les spécifications de composants par leurs caractéristiques et par les valeurs des principaux paramètres. Lors de cette étude un fichier d'aide définissant les différents composants et normes intervenant pour ce genre de système a été réalisé à l'aide de feuilles de calcul Excel, comprenant un tableau de classement des normes et une feuille les principaux titres des normes. Les normes sont classées suivant plusieurs critères : date de parution de la norme, référence et contenu.

Plus spécifiquement on a étudié un réseau en anneau, utilisant des fibres optiques standard (norme ITU G 652). On considère un système à 16 canaux, composé d'un nombre variable de nœuds qui permettent l'extraction et l'insertion de l'information des différents canaux grâce aux modules OADM. Le débit maximum du système est de 2,5 Gb/s, avec un espacement entre canaux de 100 GHz.

Afin d'accéder facilement à toutes ces informations, un tableau a été créé contenant la classification des composants WDM du réseau. Pour mettre en œuvre la simulation d'un tel système, on devait analyser un large panel de composants WDM du marché, avec leurs spécifications, leurs performances et leur prix.

Pour chaque type de composant un nombre représentatif de constructeurs a été sélectionné. Le tableau des composants est représenté sur la figure 36. Chacune des cellules incorpore un commentaire et un lien hypertexte, qui mène directement sur le catalogue ou sur le site Internet du constructeur. Les composants considérés sont les lasers, les récepteurs, les isolateurs, les atténuateurs, les modules complets, les OADM, les filtres interférentiels, les filtres de Bragg et les coupleurs.

Aux composants sont associés les différentes caractéristiques techniques : puissances émises laser, puissances seuil récepteur, pertes d'insertion et diaphonie des composants passifs, dispersion des fibres et temps de montée des composants.

Nous avons aussi inclus le prix indicatif du composant (correspondant à la date de saisie pendant l'année 2000).

| LASERS | RECEPTEURS | ISOLATEURS | ATTENUATEURS |
|--|--|-------------------------|--|
| Modulation directe 2.5 Gbps 100 GHz | PIN 2.5 Gbps APD 2.5 Gbps | | |
| ALCATEL 1915 LMI | Direct modulation 1550 nm digital laser modules with optical isolator | ISOLATOR WDM | ETEK MINIATURE VARIABLE ATTEN. |
| NORTEL LC155GC-20A | - Puissance de sortie élevée, - Faible dispersion | INLINE ISOLATORS | ETEK FIXED FIBER OPTICAL ATTEN. |
| NORTEL LC 155CW-20 | - Faible courant de seuil laser - Avec isolateur optique, cooler thermo-électrique et photodiode moniteur | FREE-SPACE ISOLATOR | KAIFA MINIATURE VARIABLE ATTEN. |
| FUJITSU FLD5F6CX-E | ALCATEL 1912 DMD | KAIFA IS-SERIES | JDS UNIPHASE FA-100 SERIES FIXED ATTEN. |
| | FUJITSU FRM3Z231KT/LT | KAIFA IU-SERIES | JDS UNIPHASE MV-47 SERIES MINIATURE VARIABLE ATTEN. |
| | FUJITSU FRM5W231DR | KAIFA IUD-SERIES | JDS UNIPHASE MV-47 L/U SERIES MINIATURE VARIABLE ATTEN. |
| | | KAIFA FL-SERIES | |
| MUX / DEMUX | | | |
| MODULES | OADM | FILTRES INTERFERENTIELS | FILTRES BRAGG |
| ETEK DENSE WDM MODULES | ETEK OADM MODULES | KAIFA WD-96 SERIES | JDS UNIPHASE FBG1500 SERIE |
| KAIFA GDW-SERIES | ALCATEL 1925 DFA | KAIFA WD-31 SERIES | JDS UNIPHASE FBGEF SERIES |
| KAIFA FDW-SERIES | JDS UNIPHASE FBG1500-ADM SERIES | KAIFA WD-48 SERIES | HIGHWAVE ITU 100 GHz FBG |
| | JDS UNIPHASE 25150 ADD/DROPP MODULE | KAIFA OSC-SERIES | JDS UNIPHASE WD1515 A1/D1 |
| | KAIFA ADIRX MODULE | ETEK DENSE WDM FILTERS | JDS UNIPHASE WD15016 M1/D1 |
| | HIGHWAVE TECHN. ITU 100 GHz | ETEK OSC-FWDM | KAIFA AD SERIES |
| | | ETEK DUAL CHANNEL WDM | |
| CIRCULATEURS | SWITCHES | AMPLIFICATEURS | FIBRE OPTIQUE |
| ETEK COMPACT CIRC. | ETEK COMPACT SWITCH | ETEK INTEGRATED MODULE | CORNING SMF-28 |
| ETEK HIGH RELIABILITY CIRC. | DICON PRISM SWITCH 1x2 | | |
| KAIFA PIR-SERIES | DICON PRISM SWITCH 2x2 | | |
| KAIFA CIR-SERIES | JDS UNIPHASE SN SERIES | | |
| KAIFA CIRMD-SERIES | | | |

Fig 36 Tableau comprenant les composants d'un réseau optique métropolitain avec hyperlien vers les fiches constructeur.

5.6.1.2 Outil de simulation des performances d'une réseau métropolitain DWDM [CI18]

Pour un opérateur l'estimation du bilan de liaison est essentielle. A cause du grand nombre de canaux en longueur d'onde dans un système DWDM l'utilisation d'outils de simulation informatique est naturelle puisqu'il faut pouvoir estimer systématiquement le bilan de liaison pour chaque canal en longueur d'onde.

Les outils de simulation du commerce nécessitent en général une connaissance très approfondie des paramètres physiques internes des composants qui ne sont en général pas disponibles, ceci constitue un problème pour une simulation fiable pour des composants en provenance de différents constructeurs.

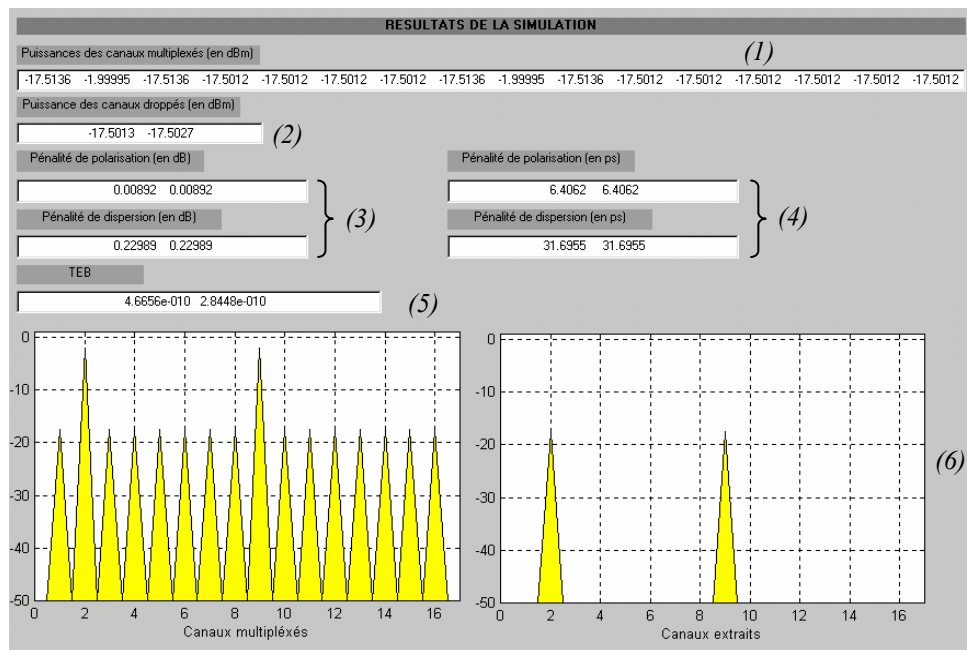
Une approche système a été adoptée utilisant les caractéristiques connues des différents composants et des normes, classées dans les tableaux interactifs décrits précédemment. A chaque nœud du réseau DWDM le niveau de puissance et les pénalités due à la dispersion et aux interférences entre canaux, sont calculés permettant in fine d'estimer le Taux d'Erreur Binaire, TEB, pour chaque canal.

Les nœuds et composants sont modélisés par des fonctions de transfert, par exemple les puissances sont regroupés dans un vecteur de dimension N correspondant au nombre des canaux. Les puissances sont transmises à travers des composants représentés par des matrices $N \times N$. Par exemple la matrice correspondant à un OXC comprend les fonctions de permutation de longueur d'onde. Les vecteurs puissance et dispersion sont calculés en chaque nœud. La méthode adoptée permet des calculs très rapides.

Le programme, développé à l'aide du logiciel MATLAB calcule les différentes caractéristiques et les sauvegarde dans un fichier spécifique.

Lors de la phase de saisie de la configuration il est possible de définir les paramètres suivants :

- 1) Le nombre de nœuds.
- 2) La longueur de chaque tronçon de fibre entre les nœuds.
- 3) Le type de nœud (OXC ou OADM).
- 4) Les canaux à extraire si le nœud est un OADM.
- 5) La puissance des canaux insérés si le nœud est un OADM.
- 6) Pour un OXC la permutation du canal.



(1) Puissance des 16 canaux transmis.

(2) Puissance des canaux extraits.

(3) Pénalités exprimées en dB.

(4) Pénalités exprimées en ps.

(5) Estimation du TEB.

(6) Visualisation de la puissance des canaux transmis et extraits.

Fig.37 Fenêtre de visualisation des résultats – niveau de puissance par canal - du simulateur de liaison DWDM métropolitain.

Cet outil permet d'étudier différentes configurations de réseau que ça soit dans une phase de conception ou de maintenance. Les différents composants sont définis exclusivement par des données issues des fiches constructeur, ceci nous permet une confrontation aisée avec des systèmes réellement existants, et aussi de comparer des solutions avec des composants de différente origine et technologie.

5.6.2 Modèle de source optique laser monomode définie par les paramètres système [CI16], [CN13]

En 1998 j'ai effectué un travail en collaboration avec Christine Le Brun chef de projet COMSIS pour l'optoélectronique, dans la société IPSIS à Rennes et aussi inscrite en doctorat à cette époque. Cette collaboration s'est poursuivie par la suite dans le projet RMNT SHAMAN dont je parlerais plus loin.

La généralisation des télécommunications par fibre optique crée une demande en logiciels permettant la simulation des systèmes et de leurs performances. La source optique constituée par un laser à semiconducteurs est un composant très important pour les performances globales, sa simulation est donc critique pour l'évaluation d'une liaison.

La vocation du logiciel COMSIS est la simulation de systèmes de communications, et en particulier des liaisons optiques. En général les modèles de lasers monomodes implantés dans les outils de simulation sont définis uniquement par des paramètres physiques internes, facteur de compression de gain, durée de vie des photons, temps de vie... Ces paramètres sont en général pris par défaut et sont rarement disponibles dans les caractéristiques des lasers disponibles sur le marché.

Un modèle de laser à semiconducteurs dédié aux logiciels de simulation a été développé, il permet de recalculer les paramètres physiques internes d'une diode laser, à partir d'un jeu minimum de données système extraites des fiches constructeur ou issues de mesures accessibles. En effet les paramètres physiques internes, qui découlent directement de la mise en équation de la dynamique du laser, déroutent souvent les utilisateurs qui sont plus familiarisés avec des données "système" telles que le courant de seuil, le rendement, la bande passante, la largeur spectrale... Le modèle implémenté dans COMSIS offre la possibilité de choisir entre la définition classique et la définition par les paramètres système, fournis par les constructeurs, à partir desquels on recalcule les paramètres physiques internes nécessaires pour la résolution des équations d'évolution (45) pour le nombre de photons S , le nombre de porteurs N , et la phase ψ . Le résultat du calcul est proposé au niveau de l'interface.

La formulation des équations d'évolution utilisant le nombre de photons S et le nombre de porteurs N , utilisée notamment par G.P.Agrawal [B30], offre l'avantage par rapport à celle utilisant les concentrations, de faire intervenir des quantités sans dimensions et d'utiliser des paramètres, comme par exemple le facteur de compression de gain normalisé, plus faciles à extraire à partir de données système que le facteur classique ε exprimé en cm^3 [R10]. Leur forme est la suivante :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= A(N - N_0)(1 - \varepsilon_n S)S - \frac{S}{\tau_p} + R_{sp} & \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{e} - A(N - N_0)(1 - \varepsilon_n S)S - \frac{N}{\tau_n} \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{\alpha}{2} \left[A(N - N_0)(1 - \varepsilon_n S) - \frac{1}{\tau_p} \right] \end{aligned} \quad (45)$$

Les données système à disposition de l'utilisateur sont principalement : la longueur d'onde λ , le courant de seuil I_{th} , le rendement puissance/courant ou pente du laser η_{LI} , d'autres grandeurs peuvent aussi être disponibles comme la largeur de raie $\Delta\lambda$ pour un courant donné, le taux d'amortissement ξ et la bande passante à -3 dB B_{3dB} pour un courant donné, l'espacement entre modes $\delta\lambda$, le chirp dans la bande passante et le bruit RIN pour un courant donné. La connaissance totale ou partielle de ces données système permet de remonter aux paramètres des équations.

Même une connaissance partielle des données système permet des simulations plus réalistes que celles obtenues avec des paramètres internes pris par défaut comme c'est généralement le cas.

Les calculs effectués par la conversion des paramètres sont :

- 1) Calcul de la durée de vie des photons τ_p en fonction du rendement puissance/courant η_{LI} , des pertes effectives miroir α_m , de la vitesse de groupe v_g , de la fréquence d'émission $\nu = c/\lambda$, de la charge de l'électron e et de la constante de Planck h .
- 2) Calcul du taux de gain différentiel A à partir de la bande passante B_{-3dB} pour un courant donné et du courant de seuil I_{th} .
- 3) Calcul de la durée de vie des porteurs τ_n à partir du courant de seuil I_{th} , du volume de la cavité vol , de la densité à la transparence n_0 , et du facteur d'émission spontanée n_{sp} .
- 4) Calcul du facteur d'élargissement de raie de Henry α à partir de la largeur de raie $\Delta\nu$, du courant correspondant $I_{\Delta\nu}$, du courant de seuil I_{th} , du temps de vie des photons τ_p et du taux d'émission spontanée $R_{sp} = n_{sp}/\tau_p$.
- 5) Calcul du coefficient de compression de gain normalisé ε_n à partir du taux d'amortissement γ , du courant correspondant I_γ et de la charge de l'électron e . A partir du chirp il est également possible de recouper les valeurs de α et de ε_n .

Voici quelques relations de passage :

$$\tau_p = 2 \cdot \frac{\eta_{LI}}{\alpha_m \cdot v_g} \frac{e}{h\nu} \quad A = \frac{(2\pi \cdot B_{3dB})^2 \cdot e}{3 \cdot (I_\gamma - I_{th})} \quad \tau_n = \frac{e}{I_{th}} \frac{n_0 \cdot vol}{(1 - 1/n_{sp})}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{4\pi \cdot \tau_p \cdot (I_{\Delta\nu} - I_{th}) \cdot \Delta\nu}{e \cdot R_{sp}}} - 1 \quad \gamma = \frac{\varepsilon_n}{2\pi} \cdot \frac{I_\gamma - I_{th}}{e} \quad chirp = \frac{\alpha \cdot \varepsilon_n}{4\pi \cdot e} \quad (46)$$

Les calculs sont effectués au niveau de l'interface de définition du modèle et les paramètres calculés sont ensuite directement injectés dans les équations d'évolution pour la simulation.

Paramètres système COMSIS.

Paramètres internes physiques.

Fig 38 Menus d'interfaces pour la définition des paramètres d'un laser à semiconducteur dans le logiciel COMSIS.

5.6.3 Le projet RMNT « SHAMAN »

5.6.3.1 Situation du sujet de recherche

Les dernières années ont vu une croissance très forte de la demande en bande passante dans les systèmes de communication ce qui a conduit à une forte croissance des réseaux optiques.

Les connexions optiques utilisées actuellement sont basées sur des modules optoélectroniques émetteur-récepteur conçus à l'origine pour des connections entre centraux. Ces modules possèdent des performances largement supérieures à celles requises pour des distances beaucoup plus courtes et leur coût est relativement élevé. Tant que le nombre de connexions restait faible l'impact du coût des modules chers était négligeable par rapport au coût global, mais comme le nombre de composants augmente constamment dans les nœuds et donc le nombre de connexions aussi, l'importance du coût des équipements devient dramatique.

Des nouvelles recherches pour obtenir de plus bas coût sont donc nécessaires pour ces applications. L'effort pour promouvoir ces recherches est soutenu par des nombreux constructeurs et fournisseurs de services. De nombreuses initiatives pour diffuser les recommandations VSR , *Very Short Range*, de l'OIF, *Optical Intenetworking Forum*, et la norme GigabitEthernet IEEE802.3ae ont ainsi vu le jour. Elles préconisent pour les liaisons optiques courte distance, jusqu'à 300 m, (10GBASE-SR) une série de 12 lasers non thermostatés de type VCSEL à faible coût, émettant dans la fenêtre en longueur d'onde 850 nm sur des fibres optiques multimodes à gradient d'indice.

L'effort de recherche dans le domaine des modules optoélectroniques à haut débit pour connexions optiques se situe actuellement surtout au niveau de la conception de modules simples comprenant des composants à faible coût et dans l'analyse de chaque élément par rapport à l'ensemble du module en termes de performance. Les étapes de fabrication et d'assemblage doivent aussi être simplifiées, ce qui conduit à imaginer des nouvelles solutions au niveau par exemple de la connectique optique, de la mécanique, du choix des matériaux et de l'encombrement. Du fait de l'intégration de plusieurs éléments optiques et électriques dans un même module, il est aussi nécessaire disposer d'outils d'aide à la conception et à l'évaluation des performances de ces modules.

Des éléments critiques de ces modules sont les émetteurs optiques qui sont assemblés sous forme de barrette de lasers VCSEL. Ces composants doivent être caractérisés expérimentalement en termes de rendement, de bruit engendré, RIN *Relative Intensity Noise*, de spectre optique et de bande passante. La recherche autour de modules optoélectroniques intégrés utilisant des VCSEL est de grande actualité et de nombreuses équipes de recherche à travers le monde s'y intéressent [B31], [B32].

5.6.3.2 Motivations du projet SHAMAN [RN16].

Jusqu'à présent du fait des solutions optoélectroniques spécifiques aux différentes applications, il n'existe pas de méthodes et de langages de CAO optoélectronique reconnus assez largement permettant la mise en commun de modèles entre constructeurs et utilisateurs comme cela existe dans le domaine de l'électronique avec les langages SPICE et VHDL. Dans ce domaine de recherche, et pour pallier cet inconvénient, on cherche à définir une bibliothèque de modèles des principaux composants optoélectroniques et des interactions avec les aspects électriques, thermiques et mécaniques. Le projet SHAMAN agit dans ce sens. Pour l'élaboration de modèles, il est nécessaire de disposer de paramètres relatifs aux composants qui doivent être extraits à partir de caractérisations expérimentales sur les systèmes optoélectroniques en cours de développement.

Supélec participe au projet « SHAMAN » labellisé RMNT depuis janvier 2002, j'en étais le responsable technique, dans un consortium composé des sociétés, IPSIS et THALES et des institutions : Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (Supaéro), laboratoire PHASE de l'Université Louis Pasteur Strasbourg et Supélec.

Le projet SHAMAN avait pour objet d'étudier de nouvelles possibilités de modélisation de modules complexes de type MOEMS, *Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems*, en tenant compte non seulement des lois comportementales des différents éléments électroniques, optiques et optoélectroniques, mais également des interactions entre eux ainsi que des effets thermiques et mécaniques agissant sur l'ensemble du module. Les développements finaux sont basés sur le langage descriptif multi-disciplinaire VHDL-AMS dans lequel sont transcrits les modèles physiques des composants.

La validation des modèles physiques ou comportementaux a été faite par la simulation d'un module optoélectronique où se côtoient les différents éléments cités précédemment. Les différentes briques et modèles développés au cours du projet ont été confrontées avec les mesures effectuées sur un démonstrateur micro-optoélectronique complet de référence de type MOEMS (voir Fig. 39), développé par Mathias Pez et son équipe du Laboratoire Central de Recherches de THALES, qui est devenue par la suite une Spin-Off à travers la société D-Lightsys. Les contraintes imposées par le packaging augmentaient les interactions, notamment sur le plan mécanique, et ont dû aussi être prises en compte. Bien qu'il n'existe pas de pièces en mouvement dans le démonstrateur, ce dernier bénéficie d'un environnement complexe où les contraintes des différents domaines sont fortement corrélées. Les modules contiennent typiquement, pour la partie émission, une barrette de lasers émettant par la surface VCSEL associée à un ASIC et couplées par des connecteurs MT à un ruban de fibres optiques. La partie réception est similaire, les lasers étant remplacés par une barrette de photodiodes. Ces modules ne nécessitent pas de régulation de température ce qui en réduit le coût. Ils permettent une transmission de l'information à haut débit, typiquement $N \times 2.5$ Gb/s, sur courte distance mais pouvant à terme atteindre 10 Gb/s. Ils sont d'un grand intérêt pour les applications de type Datacom et sont promis à un bel avenir dans le cadre du développement des réseaux d'accès dans le cadre de la norme 10 Gigabit Ethernet. Cette nouvelle technologie est intéressante par rapport à la technologie mature de multiplexage en longueur d'onde dense DWDM inégalable sur longues distances mais peut être trop coûteuse pour être transposée jusque chez l'abonné.

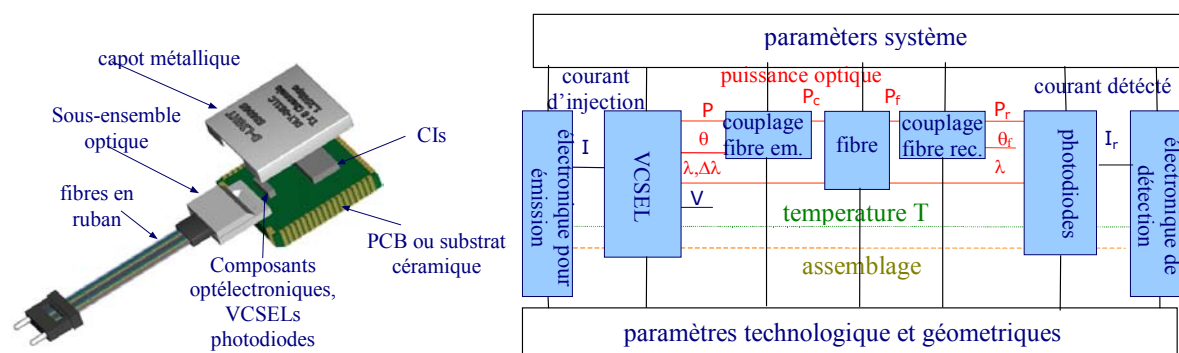


Fig 39 Module optoélectronique de transmission à courte distance et diagramme correspondant pour le projet RMNT SHAMAN.

5.6.3.3 Paramètres système pour la modélisation physique monomode des VCSEL. [R14], [C120], [CN23]

Le changement de géométrie des lasers à émission par la surface VCSEL avec une cavité verticale très courte, offrent une réelle amélioration par rapport aux lasers à cavité longitudinale à émission par la tranche de type Fabry-Pérot ou DFB tant au point de vue du faisceau d'émission qui ne présente plus d'astigmatisme, que, à cause de leurs petites dimensions dans la facilité d'intégration sous forme de barrette.

La modélisation des VCSEL se base sur le modèle des équations de continuité des lasers à semi-conducteurs. Pour un fonctionnement monomode longitudinal, elles s'expriment en fonction du nombre de photons S et du nombre de porteurs N . La résolution de ces équations permet d'estimer l'évolution de la puissance optique $\Phi(t)$ dans le temps en sortie des lasers. Les paramètres définis dans ces équations sont des paramètres physiques internes qui ne sont généralement pas disponibles pour les utilisateurs, il faut donc les extraire à partir de paramètres système, différents pour chaque laser. Une méthode d'extraction est présentée sur le tableau suivant et s'inspire de celle développée pour COMSIS présentée précédemment.

| | Paramètre interne physique | interne vs. système | Paramètre système |
|--------------|------------------------------|--|---------------------------------------|
| G_N | Gain différentiel | $G_N \approx [(e \cdot \eta_{LI}) / 2P_0] \cdot (2\pi f_{3dB})$ | Pente η_{LI} Puissance Φ_0 |
| τ_p | Temps de vie des photons | $\tau_p \approx \eta_{LI} \cdot 2e / (h\nu \cdot v_g \cdot \alpha_m)$ | Pente η_{LI} Freq. optique ν |
| τ_n | Temps de vie des porteurs | $\tau_n^{-1} \approx (e/I_{th}) \cdot [N_0 + (\tau_p \cdot G_N)^{-1}]$ | Courant de seuil I_{th} |
| β_{sp} | Fract. d'émission spontanée. | $\beta_{sp}^{-1} \approx (\tau_p/e) \cdot (I_t - e \cdot N_0 \cdot \tau_n^{-1})$ | Courant de seuil I_{th} |
| ϵ_n | Fact. de compress. de gain.. | $\epsilon_n \approx G_N \cdot [\xi \cdot (2\pi f_{3dB})^{-1} \tau_s]$ | BPass. f_{3dB} Amortiss. ξ |

Tab. 2 Conversion des paramètres système vers des paramètres internes utilisés pour la résolution des équations de continuité.

5.6.3.4 Prise en compte des effets thermiques dans la barrette VCSEL [R14], [CI20].

Les effets de température jouent un rôle important dans le fonctionnement des VCSEL, ils affectent principalement le courant de seuil $I_{th}(T)$ et dans une moindre mesure le rendement ou pente du laser $\eta_{LI}(T)$. Les VCSEL étudiés au cours de ce projet se présentent sous forme de barrettes : il faut alors tenir compte, non seulement de l'auto-échauffement du laser mais aussi de l'échauffement induit par les lasers voisins dans la barrette.

La distribution de la température dans une barrette de VCSELs peut être décrite par la méthode de résolution analytique de Joyce-Dixon [B17], [B20] déjà analysé précédemment [CI14], [CI17]. On considère un réseau de diodes lasers où chaque diode est modélisée par sa largeur effective de flux de chaleur. Chaque diode est ainsi ramenée à une source de chaleur surfacique ($L \times L$) uniforme placée sur le dissipateur thermique.

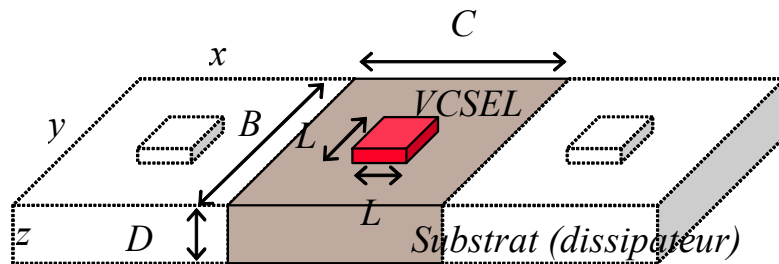


Fig. 40 Géométrie de la barrette VCSEL utilisée pour les calculs analytiques de la distribution de température à l'intérieur du substrat.

On a déterminé la température T en régime stationnaire, à l'intérieur du dissipateur de conductivité thermique κ_{th} . L'équation de propagation de la chaleur en régime stationnaire est : $\Delta T = 0$ avec les conditions aux limites suivantes :

- 1) Conditions de Dirichlet : $T(z = 0) = T_A$ où T_A est la température ambiante.
- 2) Conditions de Von Neumann : Les dérivées dT/dx , dT/dy s'annulent aux frontières. dT/dz égale à q/κ_{th} en $z = D$, où q correspond à la densité de flux de chaleur de la source de chaleur équivalente du VCSEL.

La température sur la zone active du VCSEL dépend essentiellement du courant d'injection des VCSELs adjacents. La distribution de la température en 3D dans la barrette est calculée avec une conductivité thermique $\kappa_{th} = 40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (AsGa). Un programme écrit en langage Mathcad permet de calculer la distribution en température à partir de l'équation (47) en faisant varier les paramètres du modèle. Pour obtenir des puissances différentes pour les différents VCSELs il suffit de superposer différentes solutions.

$$T(x, y, z) = T_A + \frac{4q}{BC\kappa_{th}} \left[\begin{aligned} & \frac{L^2}{4} z + L \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(K_m x) \sin(K_m \frac{L}{2})}{K_m^2} \frac{sh(K_m z)}{ch(K_m D)} \\ & + L \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(L_n y) \sin(L_n \frac{L}{2})}{L_n^2} \frac{sh(L_n z)}{ch(L_n D)} \\ & + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\cos(K_m x) \sin(K_m \frac{L}{2}) \cos(L_n y) \sin(L_n \frac{L}{2})}{K_m L_n} \right) \frac{1}{\sqrt{K_m^2 + L_n^2}} \frac{sh(\sqrt{K_m^2 + L_n^2} z)}{ch(\sqrt{K_m^2 + L_n^2} D)} \end{aligned} \right] \quad (47)$$

On remarque qu'avec les dimensions considérées ici, 250 μm d'espacement entre VCSELs de la barrette, l'influence thermique d'un VCSEL sur ses voisins est moins importante que celle due à l'auto échauffement du laser.

Sur la figure 41 on observe la distribution de température dans un plan xOy à 25 μm de la surface.

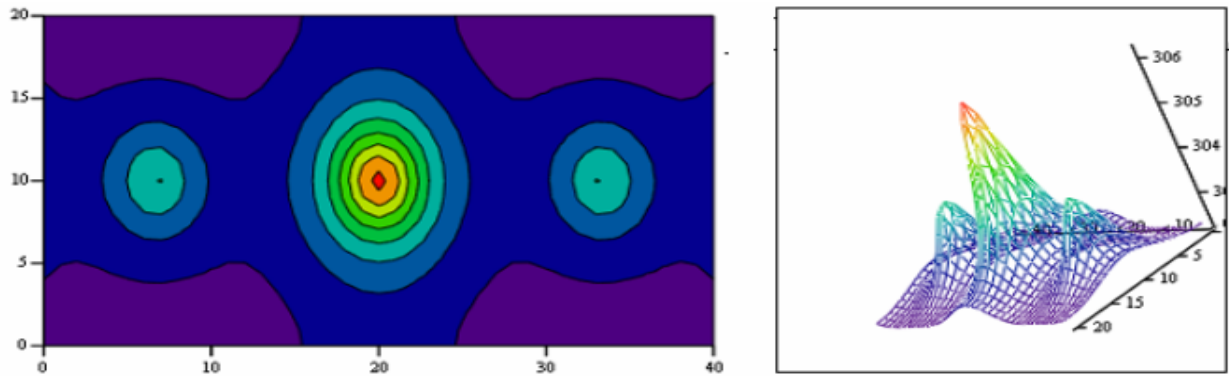


Fig. 41 Distribution de température dans le plan Oxy à 25 μm dans le substrat sous la surface de la zone active.

Les résultats précédents permettent de mettre en évidence une élévation de température des VCSELs adjacents d'environ 2°C due aux interactions thermiques au sein de la barrette. Les études ont aussi permis de montrer que l'échauffement mutuel des VCSELs se fait essentiellement par la surface du substrat.

On définit ensuite un terminal thermique auquel on associe deux paramètres: la température T et la puissance dissipée P_{Th} . Les échanges thermiques entre la diode et son environnement sont prises en compte à travers des résistances thermiques R_{Th} , les constantes de temps thermiques sont modélisées par les capacités thermiques C_{Th} .

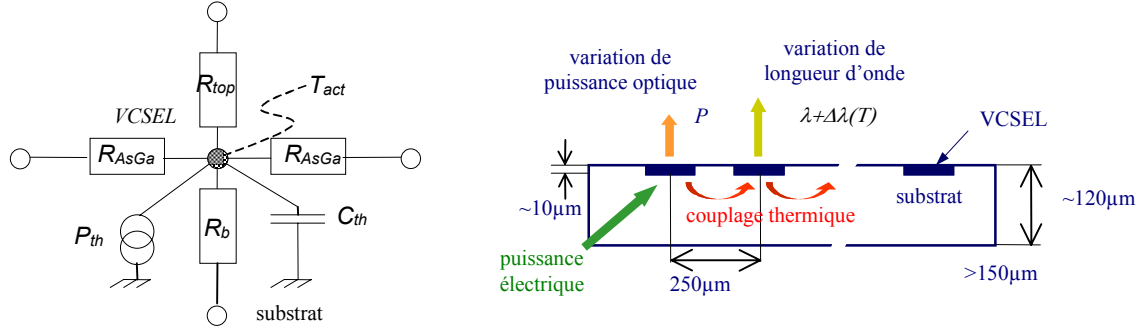


Fig. 42 Circuit équivalent thermique pour un VCSEL connecté dans une barrette. Interaction thermique à l'intérieur d'une barrette VCSEL.

Ce travail a fait l'objet d'un article de revue dans *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [R14].

5.6.3.5 Etude de l'influence des modes transverses des VCSEL [TH6], [R14], [CI23], [CI24], [CN25].

Les VCSELs considérés ici ont un comportement monomode longitudinal mais peuvent présenter plusieurs modes transverses LP_{lm} similaires à ceux rencontrés dans les fibres optiques multimodes à saut d'indice. En augmentant le courant d'injection des modes transverses apparaissent, leur nombre dépend du courant d'injection. On a pu mettre en évidence la présence des modes transverses du VCSEL (voir Fig. 43 et 44) à l'aide d'un analyseur de spectre à grande résolution qui fait partie de la nouvelle plateforme technologique de mesure en optoélectronique à Supélec.

Dans les fiches constructeurs, la largeur spectrale des modes transverses n'est jamais spécifiée. La valeur que l'on trouve, dénommée largeur spectrale, correspond en fait à la largeur spectrale $\Delta\lambda_{tot}$ maximale du VCSEL sous modulation, c'est-à-dire que la largeur spectrale tient compte de l'espacement entre modes $\delta\lambda$, qui est, en général, bien plus grand que la largeur spectrale du mode même. Si on est en présence de N modes, la largeur spectrale totale maximale sera approximativement :

$$\Delta\lambda_{tot} \approx N_{modes} \cdot \delta\lambda \quad (48)$$

D'après les courbes présentées à la figure 43 la valeur de $\delta\lambda$ est approximativement de 0,2 nm, c'est cette valeur qui doit être prise en compte ensuite pour le calcul de la dispersion chromatique en sortie de fibre optique quand on injecte la puissance optique issue du VCSEL.

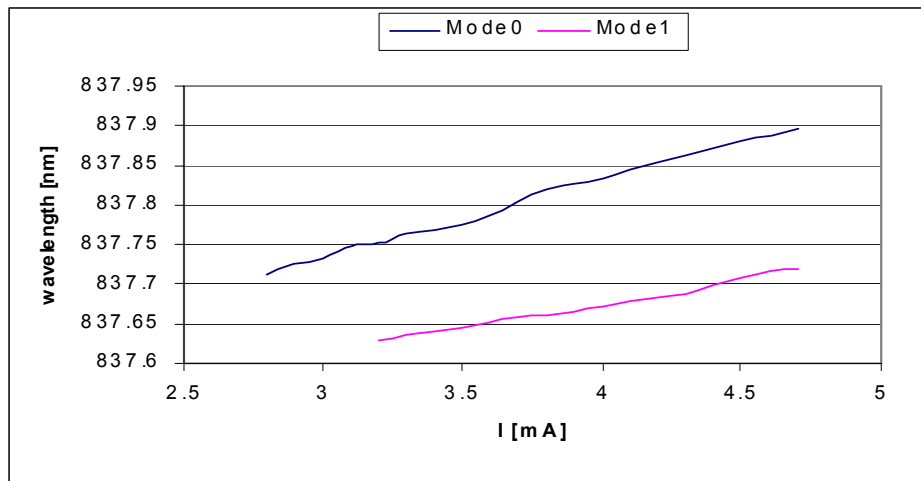


Fig. 43 Variation de la longueur d'onde pour deux modes LP_{01} et LP_{11} en fonction du courant d'injection (VCSEL TRT) mesurée à l'aide d'un analyseur de spectre optique.

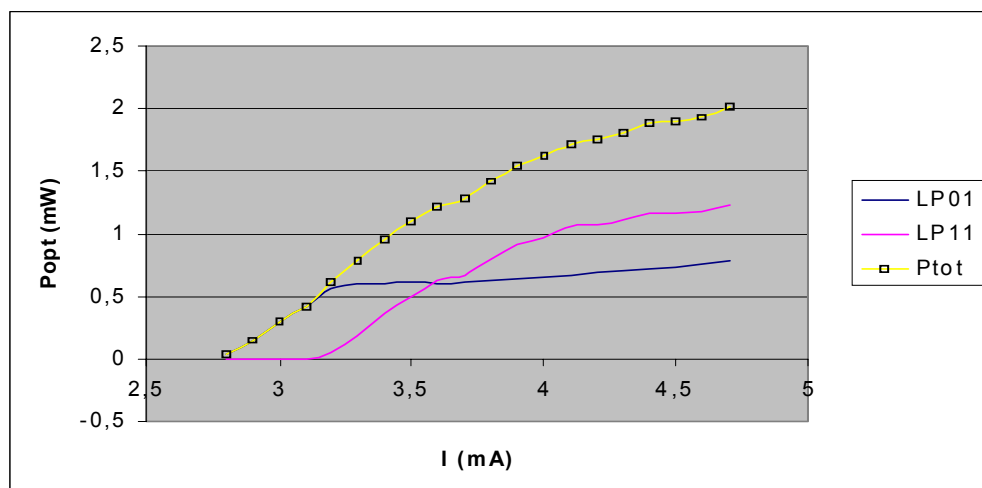


Fig. 44 Puissance optique des deux modes LP_{01} et LP_{11} et puissance totale (somme) en fonction du courant d'injection (VCSEL TRT) mesurée à l'aide d'un analyseur de spectre optique.

La présence des modes transverses modifie aussi la structure du spectre de bruit, le RIN , principalement aux basses fréquences. A notre niveau de modélisation le RIN sera modélisé par un niveau de bruit global, transmis dans la chaîne et ensuite ajouté aux divers sources de bruit du bloc de réception. Cette modélisation est suffisante dans un premier temps pour la précision demandé dans le projet SHAMAN. Des modèles plus précis tenant compte du caractère multimode seront pris en compte dans les développements ultérieurs.

On a établi des équations différentielles adaptées au nombre de modes transverses spatiaux. Ces modes ont comme origine le phénomène de *Spatial Hole Burning*, SHB, effet qui se traduit par une densité de porteurs $N(r)$ non homogène suivant la coordonnée radiale du VCSEL. En rendant les paramètres des équations de continuité dépendants des coordonnées spatiales de surface du VCSEL, on peut tenir compte de la non uniformité spatiale qui provoque une interaction entre les porteurs et les profils de modes à travers le phénomène de SHB. On obtient ainsi une équation de continuité pour chaque mode et simuler un VCSEL présentant plusieurs modes transverses.

Sous une forme non simplifiée ces équations nécessitent des résolutions spatiales, par intégrales, gourmandes en temps de calcul et ne convenant pas au langage VHDL-AMS qui gère difficilement les résolutions spatiales des équations.

Dans la méthode développée ici la dépendance spatiale explicite est éliminée par intégration, ceci nécessite des hypothèses sur les profils spatiaux des porteurs et des modes. Une décomposition du nombre de porteurs selon des fonctions orthogonales dépendantes du temps est introduite dans les équations de continuité, une décomposition selon les séries de Bessel est appropriée dans le cas d'une géométrie circulaire. Chaque mode k est décrit par le nombre de photons contenu dans ce mode S_k et par un profil spatial transverse normalisé $\phi_k(r)$. Afin d'aboutir à des équations indépendantes des coordonnées spatiales il faut choisir la forme de la fonction $\phi_k(r)$ pour un VCSEL donné. Dans le cas d'un VCSEL à surface circulaire il s'agira des modes LP_{lm} , de même forme que ceux d'une fibre optique à saut d'indice.

Je ne détaillerais pas ici les calculs des coefficients intervenant dans les équations de continuité. Ils consistent essentiellement dans la résolution des équations caractéristiques pour les modes LP_{lm} et dans le calcul des intégrales de recouvrement entre le profil des modes et le profil des porteurs.

On aboutit aux équations :

$$\begin{aligned}
 \frac{dN_0}{dt} &= \frac{\eta_i I(t)}{q} - \frac{N_0}{\tau_n} - \sum_{k=0}^M G_0 S_k \frac{\left(\gamma_{k0} N_0 - \gamma_{k0} N_t - \sum_{i=1}^M \gamma_{ki} N_i \right)}{1 + \varepsilon_k S_k} \\
 \frac{dN_j}{dt} &= -\frac{N_j}{\tau_n} (1 + h_j) - \sum_{k=0}^M \frac{G_0 \left[\phi_{kj0} N_0 - \sum_{i=1}^M \phi_{kji} N_i - \phi_{kj0} N_t \right] S_k}{1 + \varepsilon_k S_k} \\
 \frac{dS_j}{dt} &= -\frac{S_j}{\tau_{pj}} + \frac{\beta}{\tau_n} N_0 + \frac{G_0 \left[\gamma_{j0} N_0 - \sum_{i=1}^M \gamma_{ji} N_i - \gamma_{j0} N_t \right] S_j}{1 + \varepsilon_j S_j}
 \end{aligned} \tag{49}$$

Ainsi pour 2 modes il faudra résoudre 5 équations du type (49) et pour M modes, $2M + 1$ équations.

Ces modèles ont permis de comparer la réponse statique LI , puissance optique en fonction du courant d'injection, dans le cas monomode avec le cas à 3 modes transverses. D'après les expériences, la présence des modes transverses n'affecte pas la linéarité de la caractéristique globale LI d'un VCSEL, ce fait est confirmé par le modèle en sommant les puissances de chaque mode. En effet, la caractéristique LI d'un VCSEL dépend essentiellement du nombre total de photons provenant de chaque mode et ne dépend donc pas de la répartition des photons entre les modes transverses. La caractéristique globale du modèle multimode est donc équivalente à celle du modèle monomode avec la même pente η_{LI} .

Les modèles ont également permis de comparer les réponses dynamiques pour 1 et 3 modes transverses. Le courant sous forme de créneau est injecté dans la jonction du VCSEL et la puissance optique émise en sortie du VCSEL est calculée en fonction du temps.

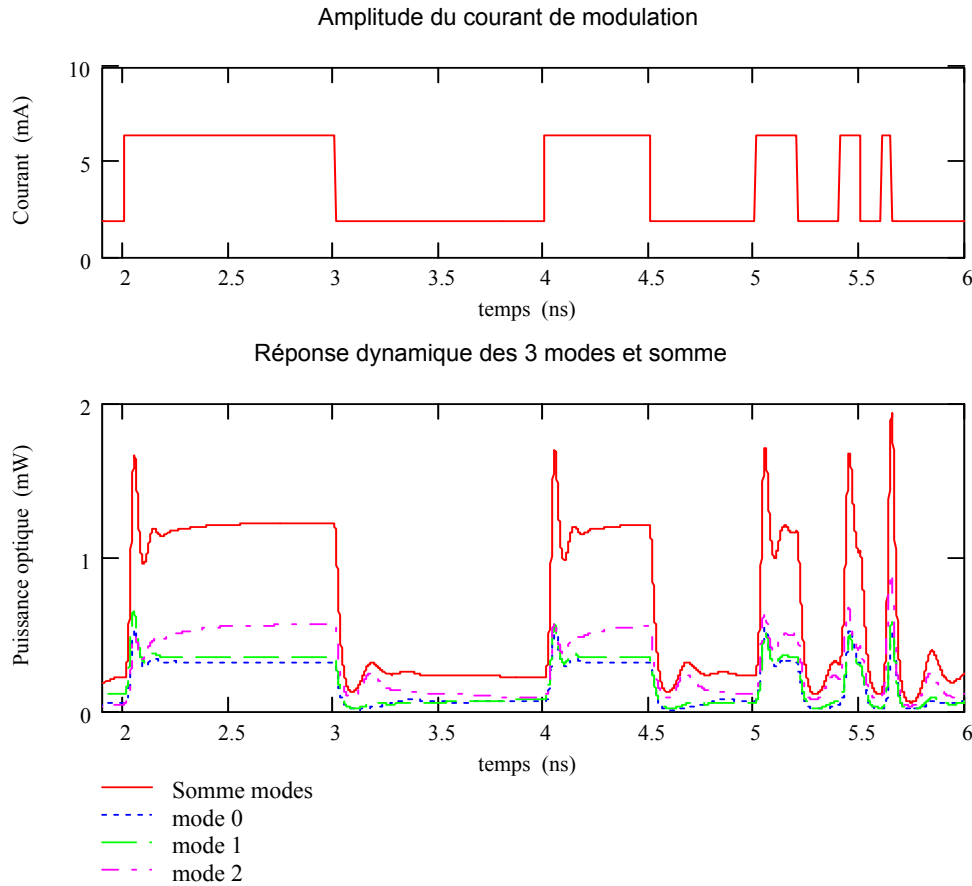


Fig. 45 Réponse dynamique d'un VCSEL avec 3 modes transverses.

De manière générale les VCSELs du commerce, présentent deux types de profils de faisceaux : un profil de faisceau gaussien et un profil de faisceau annulaire tous deux centrés sur l'axe optique. La forme précise de ces profils dépend du niveau et de la structure de l'injection du courant qui affecte la structure des modes. Il est possible de simuler ces profils pour un même composant comme le montre la figure 46 qui représente les profils de faisceaux d'un VCSEL pour différents courants d'injection calculés à partir du modèle multimode.

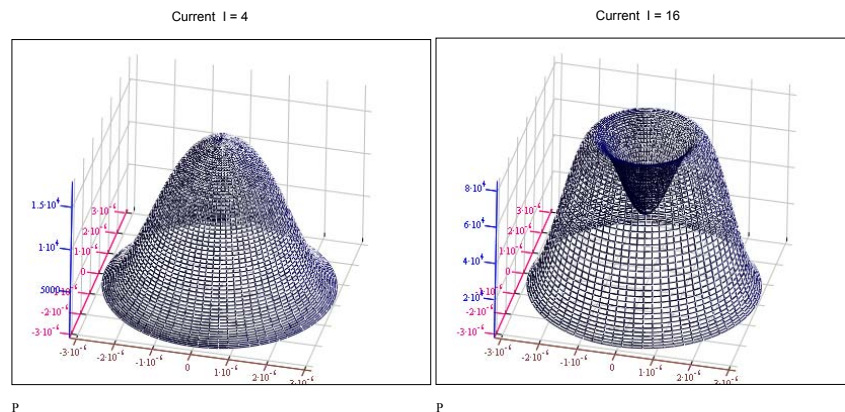


Fig. 46 Diagramme de rayonnement d'un VCSEL du à la structure de mode variable en fonction du courant d'injection.

5.6.3.6 Calcul des performances globales du module optoélectronique SHAMAN : influence du facteur Q et de la gigue sur le TEB et le diagramme de l'œil. [TH6], [R14], [CN20]

Une étude théorique a été menée afin d'évaluer le rapport signal à bruit global et le taux d'erreur binaire *TEB* en fin de chaîne. Cette étude a permis de mettre en évidence les paramètres sur lesquels il est possible d'agir afin d'améliorer les performances et la qualité. Les simulations ont été effectuées pour des modules optoélectroniques utilisant les VCSEL les plus performants avec des débits allant jusqu'à 10 Gbits/sec et un *TEB* inférieur 10^{-12} .

Tout d'abord le rapport Signal à Bruit (S/B) a été évalué en précisant ses différentes contributions. Les sources de bruits sont exprimées par les variances des courants électriques au niveau du récepteur et doivent être prises en compte dans l'estimation du rapport signal à bruit. Les sources de bruit sont les suivantes :

- 1) Le bruit quantique ou photonique propre à la photodiode i_q^2 .
- 2) Le bruit d'obscurité associé au courant inverse dans la photodiode en l'absence d'éclairement ou courant d'obscurité i_{obs}^2 .
- 3) Le bruit thermique du à l'amplificateur transimpédance et associé à la résistance équivalente de bruit à l'entrée du préamplificateur i_T^2 .
- 4) Le bruit dû au RIN du VCSEL i_{RIN}^2 . Bien évidemment chaque terme est proportionnel à la bande passante de réception Δf .

Le rapport signal à bruit global, au niveau de l'électronique de réception, est égal au rapport entre la puissance électrique du signal et la puissance électrique de bruit, ce qui revient à faire le rapport des carrés des courants :

$$\frac{S}{B} = \frac{i_{PIN}^2(signal)}{i_q^2 + i_{obs}^2 + i_T^2 + i_{RIN}^2} \quad (50)$$

Les calculs sont effectués en considérant les caractéristiques des modules à base de VCSELs Ulm Photonics et de photodiodes et d'amplificateurs transimpédances Hélix. La longueur maximale de la fibre optique multimode utilisée est de 300 m. Notre modèle pourra bien évidemment s'appliquer à d'autres types de VCSELs ayant des paramètres caractéristiques différents.

Les caractéristiques sont spécifiques à ce type de liaison :

- 1) Les modules de réception utilisés ont des niveaux de bruit d'obscurité et thermique faibles.
- 2) Dans notre application, la longueur de la fibre optique est faible, $L_{Max} = 300$ m comparée à aux liaisons optiques de type backbone aux mêmes débits. La puissance optique au niveau du récepteur est relativement élevée ce qui implique un niveau de signal élevé comparé au niveau de bruit du récepteur.
- 3) Les VCSELs utilisés dans le module ont un niveau de *RIN* relativement important, $RIN_{Max} = -120$ dB/Hz selon la norme, comparé à celui des lasers DFB monomodes e à débit identique.

Les performances globales du système sont évaluées en fonction du taux d'extinction ξ défini en dB. Celui-ci mesure le rapport entre la puissance optique d'un bit « 1 » et celle d'un bit « 0 » : $\xi = P_1/P_0$. Pour un taux d'extinction variable la puissance moyenne P_{av} est maintenue à un niveau constant. La commande d'entrée du système est le courant d'injection du VCSEL, sa valeur moyenne, pour une température donnée, imposera la puissance moyenne P_{av} et son amplitude de modulation en signal rectangulaire imposera le niveau du taux d'extinction ξ . La puissance moyenne est obtenue en asservissant le courant d'injection moyen I_0 .

La température T peut varier dans la plage d'utilisation du module entre -40°C et $+85^{\circ}\text{C}$. La dépendance en température de tous les paramètres est prise en compte dans le calcul.

Les résultats mettent en évidence que la source de bruit dominante dans notre configuration avec une faible longueur de fibre optique, est le RIN du VCSEL. Ensuite vient la contribution du bruit quantique. Les bruits thermique et d'obscurité, bien évidemment, varient avec la température mais ont une contribution nettement inférieure au bruit RIN et au bruit quantique. Le rapport signal à bruit global, dans le cas étudié ici, est donc essentiellement dû au RIN du VCSEL.

Dans les applications considérées ici, liaisons optiques courte-distance de type Gigabit Ethernet, il faut assurer des TEB inférieurs à 10^{-12} . Le facteur Q souvent utilisé dans les liaisons optiques permet d'évaluer le TEB . Le facteur Q ; est dérivé du rapport signal à bruit :

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{B}} \quad TEB = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) / 2 \quad (51)$$

Le but de cette approche est de rechercher les valeurs de RIN permettant de ne pas dégrader le TEB ou le rapport signal à bruit. On remarque que le TEB est fortement dépendant de la valeur du RIN . Une valeur supérieure à -122 dB/Hz devient critique pour notre système pour un taux d'extinction ξ inférieur ou égal à 10 dB .

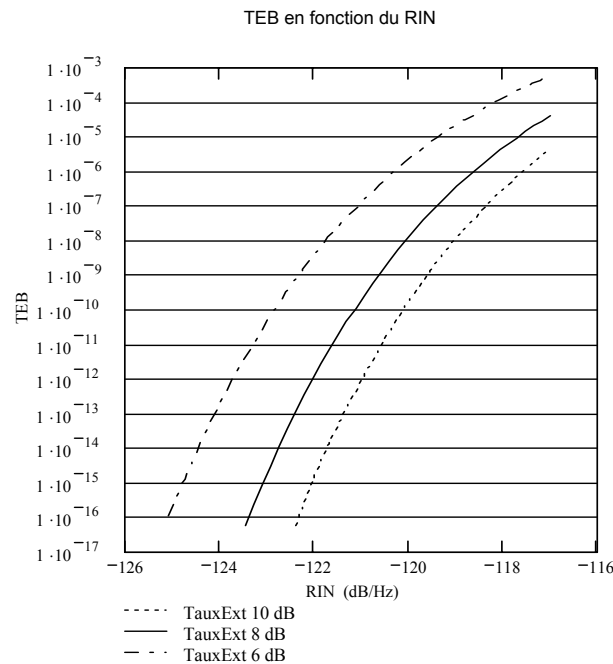


Fig. 47 TEB en fonction de la valeur du RIN du VCSEL pour différents rapports d'extinction.

La gigue ou *jitter* regroupe plusieurs types de perturbations pouvant pénaliser une transmission, et ayant donc des conséquences sur le TEB final. On considère que le rôle du jitter commence à devenir important pour des rapports signal sur bruit élevés, ce qui est le cas des applications courte distance considérées ici.

On regroupe sous le terme de jitter l'ensemble des perturbations, aberrations, dispersions optiques, qui ont pour conséquence finale de réduire l'ouverture de l'œil dans le diagramme du même nom. On peut distinguer différentes formes de jitter :

- 1) La gigue aléatoire , *random jitter, rj* : due au bruit aléatoire présent pendant les transitions d'un niveau vers l'autre. Ce bruit aléatoire se traduit par une incertitude sur l'instant d'échantillonnage.

- 2) La gigue déterministe, deterministic jitter, dj : due aux imperfections des différents circuits de traitement du signal ainsi qu'aux interactions entre les différents composants du système et à la dispersion de la fibre optique.

La gigue entre l'horloge d'échantillonnage et le flot de bits engendre un déplacement de l'instant d'échantillonnage, qui n'est alors plus idéal, ce qui peut en retour influencer la qualité de la décision. La gigue ajoute une dimension temporelle à l'évaluation du *TEB*. La gigue aléatoire peut être calculée à partir du bruit rms et la gigue déterministe est obtenue par la fiche constructeur de l'amplificateur transimpédance et par les caractéristiques de la fibre optique.

Les courbes suivantes, appelées *bath tub curves*, souvent utilisés dans la quantification de la gigue, sont graduées en unité temporelle réduite *ui*. $0,5 ui$ représente la moitié de la période symbole. Si le bit est échantillonné dans un voisinage proche de la demi période, alors le *TEB* est minimal. Plus on s'éloigne de part et d'autre de la demi période, plus le *TEB* augmente à cause de la gigue.

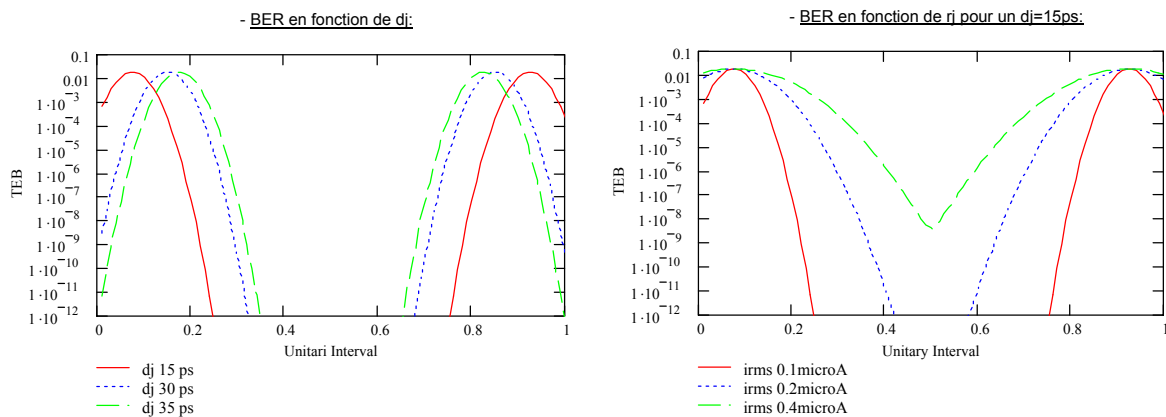


Fig. 48 *TEB selon la représentation « bath tub » influence de la gigue ou jitter.*

Enfin une représentation souvent utilisée en télécommunications est le « diagramme de l'œil » qui donne d'une manière synthétique les niveaux du bruit et de la gigue. La validation de la simulation du module complet peut être effectuée par l'analyse du diagramme de l'œil dimensionné suivant des gabarits standards définis par les différentes normes de communications. Les paramètres tels que la température, le taux de modulation, la puissance, les contraintes mécaniques et géométriques seront utilisés comme des paramètres génériques. A partir du diagramme de l'œil on extrait le rapport signal à bruit S/B , ou le facteur Q , et la gigue. L'analyse du diagramme de l'œil constitue une donnée essentielle quant au bon fonctionnement du système.

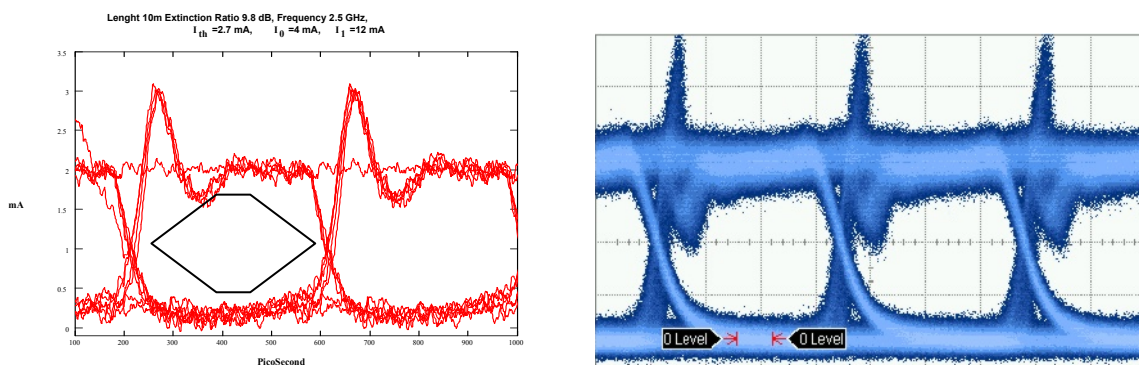


Fig. 49 *Diagramme de l'œil (gauche) simulée pour un signal optique issu d'un VCSEL, 2.5 Gb/s, en tenant compte des niveaux de bruit et de la gigue (jitter). Le gabarit standard (norme IEEE 802.3ae) est aussi représenté. (droite) Diagramme de l'œil mesuré par DCA 81600.*

5.7 Travaux plus anciens en physique fondamentale

5.7.1 RMN des conducteurs et supraconducteurs organiques : ma thèse au CEA de l'Orme des Merisiers

[TH0], [R1t], [R2t], [R3t], [CI1t]

L'intérêt des composés dénommés conducteurs organiques de type $(\text{TMTSF})_2\text{X}$, appelés aussi sels de Bechgaard, se situe dans l'existence d'une grande diversité de phases physiques obtenues en jouant sur plusieurs facteurs : la formule chimique du contre-ion $\text{X} = \text{ClO}_4, \text{PF}_6, \dots$, les conditions de température, de pression et de champ magnétique. On obtient ainsi des phases métalliques, des phases isolantes, des ondes de densité de charge, CDW *Charge Density Waves*, des ondes de densité de spin, SDW *Spin Density Waves*, des phases antiferromagnétiques et des phases supraconductrices. C'est la structure électronique quasi-unidimensionnelle de ces composés sous forme de mono-cristaux qui est responsable de cette diversité. Le couplage électronique est fort principalement suivant un axe via les orbitales π des molécules TMTSF disposées en forme de chaînes.

5.7.1.1 Travail expérimental en RMN aux basses températures

Le travail expérimental a été très important lors de ma thèse.

Du fait de l'ordre de grandeur du champ magnétique utilisé dans les expériences de RMN (Résonance Magnétique Nucléaire), de l'ordre de 10 kGauss, il fallait concevoir et réaliser un système électronique de détection travaillant à une fréquence porteuse se situant dans la gamme 10-40 MHz. Un système de type auto-oscillateur de Robinson à grand gain a été conçu et réalisé. Ce type de montage offrait la possibilité d'osciller sur des très petites bobines. Le signal RMN est séparé de la porteuse haute fréquence et puis envoyé sur un appareil à détection synchrone alimenté par des bobines de Helmholtz modulées.

Un double thermostat de type *Dewar* a été utilisé, il était constitué d'un compartiment extérieur contenant l'Azote liquide et d'un compartiment intérieur, isolé du compartiment extérieur par du vide secondaire, contenant l'Hélium liquide He^4 à 4 K. Le pompage effectué sur He^4 permettait de baisser la température de 4.2 K à 1.2 K. Le porte-échantillon contenant la bobine haute-fréquence pouvait tourner autour de son axe lors des mesures, de façon à pouvoir mesurer des spectres RMN en fonction de l'orientation des axes de l'échantillon par rapport à la direction du champ magnétique statique.

5.7.1.2 Résultats nouveaux obtenus pendant ma thèse

- 1) Mouvement des groupes méthyles CH_3 par effet Tunnel : l'étude des spectres RMN en continu en fonction de l'orientation du champ magnétique H_0 a mis en évidence pour la première fois la rotation par effet Tunnel quantique des CH_3 dans un cristal solide.
- 2) Anisotropie des largeurs de raie par interaction dipolaire : les largeurs de raie fines dans l'état métallique de $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ ont été expliquées par un calcul d'interaction dipôle-dipôle avec les atomes voisins de la molécule en tenant compte de la structure cristallographique.
- 3) Phase SDW et incommensurabilité du vecteur de *nesting* : les mesures sur $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ ont montré une absence de structure des spectres RMN ceci ne pouvait pas être expliqué par les théories qui supposaient un ordre magnétique commensurable avec le réseau cristallin.
- 4) Structure de bande avec accord de structure de bande incommensurable : afin d'expliquer les résultats sur $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ une structure de bande plus réaliste des conducteurs organiques a été calculée faisant intervenir une deuxième intégrale de transfert, ceci a permis d'expliquer l'incommensurabilité, par le mécanisme de *nesting*.

5.7.2 Recherche dans le domaine de l'électromagnétisme aux très hautes énergies.

Ce travail est issu de nombreuses discussions avec Frederic Hartemann, ancien camarade de faculté à Orsay, que nous avons eu au cours des années sur des sujets qu'on pourrait qualifier dans un jargon anglo-saxon de *Blue-Sky research*, c'est-à-dire qu'on a poussé loin certaines idées dont les confirmations expérimentales ne sont pas encore d'actualité mais qui pourraient se trouver très intéressantes dans l'avenir. Ces activités sont bien en marge de mon activité principale ce qui explique pourquoi elles n'ont pas, pour l'instant, donné suite de ma part à des recherches plus approfondies. J'ai effectué un premier séjour à Cambridge Massachusetts au MIT, ces travaux se sont poursuivis en filigrane de mon activité principale et plus concrètement lors d'un séjour en 1994 et 1995 en Californie à UCLA et au laboratoire Lawrence Livermore.

5.7.2.1 Electrodynamique relativiste des milieux continus [R4p], [CI4p].

Il s'agit d'un travail théorique qui constitue une voie de recherche en amont aux frontières de la physique de la matière condensée et de l'électromagnétisme relativiste. Nous avons pris en compte les effets relativistes des champs liés aux particules chargées en mouvement quand ils se trouvent dans un environnement différent de celui du vide où les champs électromagnétiques du milieu matériel, sont transformés dans le repère d'un électron relativiste. Ceci a été motivé par le fait que dans un repère en mouvement les propriétés de symétrie des champs électromagnétiques sont modifiées. Dans le vide ceci se traduit par les transformations de Lorentz dont les effets sont bien connus, mais dans un milieu matériel, où la symétrie joue un rôle primordial, des effets nouveaux peuvent apparaître. Les transformations des champs sont exprimés dans leur généralité, pouvant s'appliquer aussi aux milieux non-linéaires.

En transformant les champs dans un milieu matériel diélectrique il est montré que l'effet Cerenkov peut être représenté comme une singularité de l'indice diélectrique dans le repère de l'électron.

Mon idée de départ était que le changement de référentiel lié à la particule en mouvement implique un changement de symétrie et donc une possibilité d'avoir des phénomènes du type transition de phase.

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans la revue *Physical Review A* .[R4p].

5.7.2.2 Analyse spectrale non linéaire de diffusion Compton d'impulsions lasers. [R11p].

Une démarche similaire a été appliquée afin d'expliquer l'apparition de phénomènes chaotiques et de modulation de fréquence dans les spectres de diffusion obtenus par l'interaction d'un faisceau laser avec des électrons relativistes.

La dynamique relativiste d'un électron soumis au champ électromagnétique classique d'un laser qui émet des impulsions ultra-courtes est étudiée pour des intensités variables. Les effets de modulation de fréquence associés au déplacement de fréquence Doppler non linéaire d'origine relativiste du rayonnement retrodiffusé sont analysés pour une polarisation circulaire. Une expression analytique pour tout le spectre a été obtenue. Dans le repère de l'électron le mouvement consiste dans des trajectoires non inversibles du fait de la forte modulation de fréquence induisant un phénomène non linéaire de type chaotique.

Ce travail a fait l'objet d'un article de revue dans *Physical Review E* [R11p].

6 Perspectives de recherche

Parmi les thèmes décrits plus haut plusieurs sont encore d'actualité. D'autres paraissent regagner un intérêt dans un proche avenir.

Le laboratoire s'équipe de plusieurs instruments de mesure et caractérisation de systèmes optoélectroniques très rapides permettant des projets d'études expérimentales dans le domaine des télécommunications optiques.

6.1 Nouvelle plateforme d'étude et caractérisation de modules optoélectroniques

C'est la croissance constante des communications, plus particulièrement en Ile-de-France, due à l'augmentation du trafic de données principalement par l'augmentation du nombre d'abonnés aux services d'Internet, qui a conduit à accroître les débits de transmission. Cependant, la récente crise qu'a subie le monde des télécommunications a considérablement bouleversé les architectures des communications modernes en recentrant le marché sur les applications bas coûts et courtes distances. D'autres secteurs, militaire, avionique ou médical par exemple réclament une augmentation des débits disponibles afin de satisfaire la demande en traitement de données. Ces derniers domaines qui privilégiaient jusqu'à présent des solutions spécifiques s'orientent de plus en plus vers les technologies issues des télécommunications mais avec des contraintes spécifiques, comme la sécurisation des données.

Le projet de plateforme soutenue par le Conseil Général de l'Essonne, programme ASTRE (Action de Soutien à la Technologie et la Recherche en Essonne) et par la Région Ile de France, programme SESAME (Soutien aux Equipes Scientifiques pour l'Acquisition de Moyens Expérimentaux), vise à mettre en place un équipement d'expérimentation et de mesure pour l'étude, l'évaluation et la modélisation de modules optoélectroniques. Ce projet est destiné à déterminer et évaluer les paramètres critiques d'une transmission optique pour des débits allant jusqu'à 40 Gb/s. Les systèmes concernés sont principalement les nouvelles générations de modules MOEMS. Ces mesures permettront de proposer des grandeurs mesurables reproductibles servant de données de référence aux futurs outils de CAO optoélectroniques.

Ces méthodes imposent de nouvelles méthodes de mesure des performances. Dans un système de communications numériques de données, le critère de qualité de transmission universellement admis est le TEB, Taux d'Erreurs Binaire. Dans les communications optiques, on préconise qu'il doit être inférieur à 10^{-12} . Une des grandes difficultés de ce type de transmission est l'évaluation correcte du TEB. Avec notre système, nous pouvons caractériser les diagrammes de l'œil jusqu'à 40 GHz avec des mesures du facteur Q et de la gigue.

Des caractérisations de spectre et de chirp pourront être effectuées à l'aide d'instruments dédiés.

Dans le cadre d'Optics Valley, l'équipement demandé étendra les possibilités du projet de plate-forme technologique spécialisée en « Métrologie, Caractérisation, Test » PRISME, Plateforme Régionale Ile-de-France Sud de Mesures et d'Expertises, en collaboration avec les partenaires au sein du consortium : Université Paris-Sud XI, IEF, IUT, IOTA, LNE, Lycée Fresnel et Thales.

L'équipe de recherche en optoélectronique de Supélec apportera ainsi son expertise en transmissions optiques haut débit, modélisation et expérimentation, aussi bien sur l'aspect optique que sur l'aspect électronique haute fréquence et traitement du signal. Notre système servira à la recherche de nouvelles méthodes de mesure et de nouveaux paramètres pouvant valider les modèles issus de nos recherches sur des nouveaux composants optoélectroniques. Il servira de plate-forme technologique de caractérisation optoélectronique pour les utilisateurs dans le département de l'Essonne et dans la

région Ile-de-France au sein de l'association Optics Valley. La maîtrise acquise dans le domaine de l'optique, des techniques micro-ondes et des télécommunications servira utilement dans des projets de recherche multidisciplinaires et multi-domaines décrits ci-dessus.

6.2 Les développements du projet RMNT SHAMAN

Le projet SHAMAN a permis de développer les premiers éléments d'une bibliothèque de composants pour les systèmes optoélectroniques dans un langage commun et non propriétaire. Il a également permis de montrer que le prototypage virtuel de systèmes complexes est certes possible mais doit s'appuyer sur une équipe pluridisciplinaire intégrant des physiciens, des ingénieurs, des architectes systèmes et des spécialistes de CAO ceci tant que les bibliothèques de base seront incomplètes.

Les travaux sur le projet SHAMAN vont se poursuivre notamment dans le cadre des différentes thèses, espérant ainsi améliorer les modèles des composants de manière à prendre en compte des phénomènes physiques plus fins qui pourraient permettre l'amélioration de la conception des composants. On pourrait également effectuer des simulations du module complet par la prise en compte simultanée de différents effets et les confronter avec les mesures donnant le diagramme de l'œil et le TEB afin d'effectuer des test en temps réel. Les outils de manipulations des modèles complexes doivent encore être améliorés afin d'augmenter la productivité des concepteurs et architectes système et les outils de haut niveau prenant en charge la spécification doivent encore être développés.

Le travail entamé sur ce projet pluridisciplinaire sur des modules optoélectroniques de type MOEMS a permis une simulation complète du module par une modélisation de chaque composant et de son interaction avec l'environnement dans le module. Néanmoins il reste à approfondir certains points notamment en vue d'une application aux débits prévus de 10 Gbit/s avec des composants de nouvelle génération, notamment les VCSEL bas coût non thermostatés. Le projet SHAMAN constitue une première étape de la modélisation multidomaine en optoélectronique et laisse entrevoir de nombreuses et intéressantes perspectives.

La thèse préparée par Asghar Gholami sous ma direction est en cours, elle se situe dans le prolongement du projet SHAMAN. Un point important étudié est l'influence de la forme du diagramme de rayonnement en sortie des VCSEL sur la bande passante globale avec une fibre optique multimode. Ce problème est critique dans les systèmes de communication optiques courte distance, moins de 300 m, et bas coût et l'on préconise cette technologie aux débits élevés jusqu'à 10 Gbit/s. En effet la forme du diagramme de rayonnement et donc les conditions d'injection dans une fibre optique multimode, du fait de l'excitation sélective des modes de propagation affecte fortement la dispersion intermodale et par conséquent la bande passante, l'effet est très sensible aux changements géométriques. En simulant tous les paramètres de la chaîne de transmission, il sera possible de déterminer les paramètres critiques afin d'assurer une bande passante suffisante. Les effets de polarisation sur les différents modes pourront aussi être pris en compte. De nouvelles structures de VCSEL pourront ainsi être proposées réduisant les effets multimodes dus au SHB, *Spatial Hole Burning*, et d'instabilité de polarisation. La prise en compte des effets de rétroaction optique devront aussi être pris en compte au niveau du couplage des VCSEL avec la fibre optique. Cet effet pouvant affecter la réponse dynamique, les bruits et la puissance de sortie.

Au niveau des performances une prise en compte plus précise des termes de bruit permettra d'avoir une meilleure évaluation des performances notamment en termes rapport Signal sur Bruit et de taux d'erreurs TEB : essentiellement les bruits d'intensité laser, RIN pour chaque mode. L'influence précise de la gigue en association avec le bruit devra aussi être approfondie de façon à bien représenter le comportement réel tenant compte des spécifications des normes, diagramme de l'œil et gabarit.

Les prochains projets de ce type devront avoir pour objectif le développement d'un environnement logiciel plus complet permettant de prendre en charge la conception ou la re-conception d'un système depuis les spécifications jusqu'au niveau de l'industrialisation en passant par des simulateurs de

nouvelle génération et des nouvelles méthodes de vérifications de modèles encore à concevoir. Ainsi, toute l'expertise accumulée durant le projet SHAMAN pourra servir à modéliser d'autres démonstrateurs de type MOEMS et pourra également être étendue à d'autres applications comme les liaisons optiques longues distance DWDM, les liaisons optiques aériennes, le FTTH ... L'extension à des nouvelles technologies avec des VCSEL émettant à 1300 nm et 1550 nm peut aussi être envisagée ou avec des nouvelles technologies de fibres optiques en plastique large bande par exemple.

6.3 Phénomènes chaotiques

L'analyse du chaos dans un laser peut être poursuivie par l'étude générale de la dynamique spatio-temporelle d'un laser monomode à élargissement homogène régi par les équations non-linéaires de Maxwell-Bloch. L'intégration de ces équations montre des plages de solutions instables, présentant un phénomène d'intermittences, notamment en fonction du paramètre de désaccord de fréquence, *detuning*, δ . Ce comportement pourra être mis en relation avec les comportements d'un laser à semiconducteurs au seuil d'oscillation, phénomène dont l'origine physique n'est pas complètement élucidée comme précédemment exposé dans ce mémoire. Des études expérimentales sur des lasers à semiconducteurs seront très intéressantes plus particulièrement par la recherche des zones d'instabilité dans la région du seuil en fonction du paramètre α de Henry.

Une diode laser à semiconducteurs sous l'action de la rétroaction optique, présente des comportements chaotiques. Il serait intéressant de coupler de tels composants entre eux de manière à analyser le comportement collectif. De nombreuses études se sont portées sur des systèmes comportant plusieurs diodes laser. De tels systèmes sont souvent réalisés grâce à des VCSEL, en effet, de part leur géométrie, les VCSEL sont facilement intégrables sous forme de matrices de diodes. En fonction de certaines valeurs critiques, nous pourrions retrouver un comportement chaotique, hyperchaotique ou de synchronisation avec des périodicités spatiales. Des études expérimentales à l'aide de VCSEL et tirant profit des analogies avec des oscillateurs électroniques chaotiques, pourront mettre en évidence des phénomènes collectifs nouveaux.

Les analogies avec les comportements chaotiques dans les solitons photoréfractifs se situent dans des ensembles hyperchaotiques, qu'on dénomme CNN, *Cellular Neural Networks*. Pour ce type de système dynamique il est possible d'obtenir des solutions ordonnées, de type auto-oscillations, à partir du couplage de systèmes chaotiques. Le désordre qui apparaît dans les gerbes de solitons est aussi dû à la présence de nœuds d'interactions. Nous allons donc nous attacher à mettre en évidence des analogies entre différents phénomènes et à les modéliser notamment pour les phénomènes chaotiques dans les lasers et les oscillateurs électroniques d'une part et les solitons photoréfractifs d'autre part dans le cadre du PPF (Projet Pluri Formation).

L'étude des phénomènes chaotiques est très riche et n'a pas encore été entièrement exploité tant au niveau théorique qu'expérimental. On peut citer par exemple le phénomène de synchronisation du chaos non prévu au début des études sur ces phénomènes.

Des liens avec la physique quantique commencent à apparaître, l'étude de l'oscillateur laser pourra amener des lumières sur ce point.

Les applications aux nanotechnologies et à la biologie sont prometteuses. La recherche sur les effets chaotiques est en pleine activité et de nombreuses applications commencent à être envisagées. On peut citer par exemple dans le domaine des télécommunications où le chaos dans les lasers à semiconducteurs est utilisé dans des schémas de codage et de cryptage.

7 Bibliographie pour la synthèse des recherches

- [B1] SCHAWLOW A.L., TOWNES C.H., Infrared and Optical Masers, *Physical Review* (1958), **112**, n°6, pp. 1940-1949.
- [B2] LAX M., Classical Noise V. Noise in Self-Sustained Oscillators, *Physical Review* (1967), **169**, n°2, pp. 290 - 307.
- [B3] HENRY C.H., "Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers", *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-18, -2, no 2, pp. 259-264 (1984).
- [B4] RISKEN H., SEYBOLD K., "Linewidth of a Detuned single Mode Laser Near Threshold", *Physics Letters* (1972), **38A**, n°2, pp. 63-64.
- [B5] GERHARDT H., WELLING H., GÜTTER A., "Measurements of the Laser Linewidth Due to Quantum Phase and Quantum Amplitude Noise Above and Below Threshold. I", *Z. Physik* (1972), **253**, pp. 113-126.
- [B6] OSINSKI. M and BUUS J. « Linewidth broadening factor in semiconductor lasers – an overview », *IEEE J. Quant. Electron.*, QE-23, pp. 9-29 (1987).
- [B7] R. HUI., N. CAPONIO, S. BENEDETTO, I. MONTROSSET, "Linewidth of a Semiconductor Laser Operating near Threshold", *IEEE Photonics Technology Letters* (1992), **4**, n°8, pp. 841-843.
- [B8] G.P. AGRAWAL and G.R. GRAY "Intensity and phase noise in microcavity surface-emitting semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol 59, pp.399-401 (1991).
- [B9] Y. YAMAMOTO, "AM and FM Quantum Noise in Semiconductor Lasers - Part I: Theoretical Analysis", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol 19, pp. 34-46 (1983).
- [B10] A. MOORADIAN, «Laser linewidth», *Physics Today*, May 1985, pp. 43-48.
- [B11] John BARDEEN, "Superconductivity and Other Macroscopic Quantum Phenomena", *Physics Today*, December 1990, pp. 25-31.
- [B12] HUANG, J., CASPERSON, L. W., "Gain and saturation in semiconductor lasers", *Optical and Quantum Electronics*, 1993, **25**, pp. 369-390.
- [B13] V. VOLTERRA, *Theory of Functionals*, London: Blackie, 1930 (reprinted by Dover, New York, 1959).
- [B14] K. Y. LAU, and A. YARIV, "Intermodulation distortion in a directly modulated semiconductor injection laser" *App. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 1034-1036, 15th Nov. 1984.], [K. Y. Lau and A. Yariv, "Ultra -High speed Semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-21, p. 125, 1985
- [B15] SCHATZ R., "Dynamics of Spatial Hole Burning Effects in DFB Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 31, no. 11, pp. 1981-1993, 1995.
- [B16] KINOSHITA J., "Modeling of High-Speed DFB Lasers Considering the Spatial Holeburning Effect Using Three Rate Equations", *IEEE J. of Quantum. Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 929-938, 1994.
- [B17] W.B. JOYCE, R.W. DIXON: ' Thermal resistance of heterostructure lasers' *J. Appl. Phys.*, vol 46, 1975 pp 855-862.
- [B18] H. HILLMER, K. MAGARI, Y. SUZUKI, "Chirped Gratings for DFB Laser Diodes Using Bent Waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 10-12, Jan 1993.
- [B19] B. TROMBORG, H. OLESEN, X. PAN et S.SAITO, "Transmission Line Description of Optical Feedback and Injection Locking for Fabry-Perot and DFB Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-23, pp 1875-1889, 1987.

- [B20] W. NAKWASKI: 'Thermal model of laser diode array' *Electronic Letters* 1986 vol 22 pp1169-1170.
- [B21] G.S. PANDIAN, S. DILWALI, « On the Thermal FM Response of a Semiconductor Laser Diode », *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.4, n°2, Feb. 1992, pp.130-133.
- [B22] COHEN, J. S., LENSTRA, D. : ' Spectral properties of the coherence collapsed state of a semiconductor laser with delayed optical feedback', *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**, (6), pp. 1143-1151.
- [B23] GROSSMAN, S. and RICHTER, P. H.: 'Laser threshold and nonlinear Landau fluctuation theory of phase transitions', *Z. Physik*, 1971, **242**, pp 458-475.
- [B24] M. P. KENNEDY : « Chaos in the Colpitts Oscillator » *IEEE Tr; on Circuits and Systems*, Vol 41, No 11, Nov 1994.
- [B25] L. O. CHUA et R. N. MADAN : « Sights and Sounds of Chaos » IEEE 1988
- [B26] F.R. GFELLER and U. BAPST, "Wireless In-House Data Communication via Diffuse Infrared Radiation", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 11, November 1979, pp. 1474-1486.
- [B27] R. TOMKEWITSCH, "Dynamic Route Guidance and Interactive Transport Management with ALI-SCOUT", *IEEE Tr. On Vehicular Technology*, vol. 40, N° 1, Feb. 1991, pp. 45-50.
- [B28] T. OKOSHI, S. RYU, K. EMURA "Measurement of polarisation parameters of a single-mode optical fiber" *Journal of Optical Communications* , 2(1981)4, pp. 134-141
- [B29] H.C.LEFEVRE "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers" *Electronics Letters*, Septembre 1980, volume 16, numéro 20, pp. 78-780.
- [B30] AGRAWAL G.P et .DUTTA N.K, *Long-wavelength Semiconductor Lasers* , Van Nostrand Reinhold, New York (1986).
- [B31] F. MIEYEVILLE, G. JACQUEMOD, F. GAFIOTt, and M. BELLEVILLE, "A behaviour opto-electrothermal VCSEL model for simulation of optical links" *Sensors and Actuators – A Physical*, Vol 88, pp 209-219, 2001.
- [B32] M. JUNGO, F. MONTI di SOPRA, D. ERNI, W. BAECHTOLD, "Scaling effects on vertical-cavity surface-emitting lasers static and dynamic behavior," *J. Appl. Phys.*, vol 91, n° 9, pp.5550-5557, 2002.
- [B33] I. PASTOR, V.M. PEREZ-GARCIA, E. ENCINAS-SANZ and J.M. GUERRA, "Different and coexisting routes to chaos along a common bifurcation path in the Maxwell-Bloch equation", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 6, No. 3 (1996), pp. 589-601.